Pyramidenbau im Alten Ägypten

Die Pyramiden des Alten Reiches faszinierten seit je her die Besucher Ägyptens. Die außergewöhnlich beeindruckende Größe der Bauwerke und die gewaltigen Abmessungen der verbauten Steine bleiben für jeden Betrachter unvergesslich. Immer wieder wurde die Frage gestellt, was die damaligen Könige veranlasst hat, solch gewaltige Grabstätten zu errichten. Der Bau der Pyramiden im AR muss jedoch im Zusammenhang mit den religiösen Vorstellungen, den seinerzeitigen gesellschaftlichen Verhältnissen sowie dem damaligen Stand der Technik und den logistischen Fähigkeiten der Baumeister betrachtet und erklärt werden.

Die Fragen nach den dabei verwendeten Techniken und Verfahren beschäftigten in den vergangenen Jahrhunderten viele Ägyptologen, Archäologen, Ingenieure und interessierte Laien. Den Ägyptologen und auch den Archäologen sind die baulichen und technischen Aspekte, die für die Errichtung der Pyramiden zu beachten sind, im Allgemeinen nicht sehr geläufig. Daran mangelt es oft bei den von ihnen entwickelten Hypothesen über den Pyramidenbau; sie werden aber dennoch immer wieder zitiert und weiter verbreitet. Andererseits bemühen sich viele „Nicht-Ägyptologen" um Erklärungen zu bautechnischen Fragen und legen unterschiedlichste Berechnungen dazu vor. Diese Betrachtungsweisen enthalten oft interessante und diskussionswürdige Aspekte. Häufig werden dabei jedoch die archäologischen Kenntnisse außer Betracht gelassen. Die entsprechende Beachtung und Anerkennung seitens der Welt der Ägyptologie für diese Gruppe der „Nicht-Ägyptologen" wird oft vermisst.

Trotz vieler in den vergangenen Jahrzehnten vorgelegter Veröffentlichungen und vorgetragener Hypothesen konnte für die Fragen, nach welchen Verfahren, in welchen Abschnitten, mit welchen Hilfsmitteln und mit welchem personellen Aufwand die Pyramiden des AR geplant und gebaut wurden, noch kein in sich geschlossener Lösungsvorschlag zur Diskussion gestellt werden.

Ausgehend vom Stand der aktuellen ägyptologischen Forschung und den archäologischen Befunden wird im Folgenden eine neue, in sich widerspruchsfreie Hypothese für den Bau der Stufenpyramiden[1] im AR vorgestellt[2]. Bei der Entwicklung dieses Bauvorschlages wurde von folgenden Voraussetzungen bzw. Festlegungen ausgegangen:

– Nur die im AR bekannten und archäologisch nachgewiesenen bzw. aufgrund der Belege als wahrscheinlich anzunehmenden technischen Hilfsmittel, Bauverfahren, Transportverfahren und Werkzeuge werden berücksichtigt.
– Gleiches gilt für die archäologischen Befunde der baulichen und bautechnischen Merkmale der Pyramiden des AR.
– Darüber hinaus werden bau- und sicherheitstechnische Aspekte für den Bau der Verkleidung und für die Glättung der Außenflächen der Pyramide sowie die Möglichkeiten, gefahrlos zur jeweiligen Baustelle auf der Pyramide zu gelangen, mit einbezogen.
– Regelmäßig durchzuführende Messungen am Baukörper müssen während der Bauzeit möglich sein.
- Eine Berechnung der Bauzeiten mehrerer Pyramiden nach der entwickelten Bauhypothese wird vorgenommen.

---

[1] Unter dem Begriff „Stufenpyramiden" werden Bauwerke verstanden, die im Inneren aus einem stufenförmigen Kernmauerwerk mit nach oben hin kleiner werdenden Grundflächen bestehen. Die Außenmauern der einzelnen Stufen sind aus großen, exakt behauenen Steinen mit einem Rücksprung von ca. 80° errichtet. Im Inneren werden Steine unterschiedlicher Formate, Bauschutt, Schotter, Tafla oder Mörtel verbaut.

[2] Müller-Römer, F. „Der Bau der Pyramiden im Alten Ägypten", Utz-Verlag München; 2011.

Bautechnik im Alten Reich

Im AR gab es keine exakten und wissenschaftlich fundierten Kenntnisse der Gesetze der Statik und der Mechanik sowie ihrer Anwendung. Statische Berechnungen, wie sie heute üblich sind, existierten offensichtlich nicht. Handwerkliche und bautechnische Fähigkeiten haben sich aufgrund langjähriger Beobachtungen der Natur und daraus gewonnener Erfahrungen ergeben und wurden stetig weiter vervollkommnet. Die Technik der Herstellung von Säulen, Architraven, Obelisken etc. sowie die entsprechenden Bau- und Transporttechniken waren von großer Kontinuität und stetiger evolutionärer Weiterentwicklung geprägt. Sie fanden im NR ihren Höhepunkt. Neue bzw. veränderte Arbeits- und Bauverfahren entwickelten sich aufgrund gemachter Erfahrungen, neuer Werkstoffe sowie vor Ort vorhandener Gesteinsformationen. Generell ist jedoch von „einfacher Technik" und daraus sich ergebenden „einfachen Lösungen" auszugehen.

Andererseits ist der Bau der großen Pyramiden ohne gründliche Planung sowie ohne das Erstellen detaillierter Baupläne, ohne einen exakt ausgearbeiteten Ablaufplan und ohne ein hoch entwickeltes logistisches Transportwegemodell nicht vorstellbar. Die Auswahl der Standorte geeigneter Steinbrüche sowie des Transporthafens, das Vermessen und die Ausrichtung der Pyramidengrundfläche, die Berechnung, Herstellung und der Transport der Baumaterialien sowie deren Kennzeichnung und Zwischenlagerung erforderten große Erfahrung und eingehende Überlegungen. Aus dem MR ist bekannt, dass die Steinblöcke mit genauen Kontrollmitteilungen (Herstellungsdatum, Handwerkerbenennung, Transportwege, Lagerstätte etc.) versehen wurden[3]. Es ist anzunehmen, dass bereits im AR ein vergleichbares System bestand.

Die Arbeitsvorbereitung im gesamten Baubezirk musste sehr gut organisiert werden. Das gilt auch für den später beim Bau genau einzuhaltenden Zeitplan, nach dem die Materialien aus dem Steinbruch und vom Hafen anzuliefern sowie die Arbeitskräfte einzusetzen und zu versorgen waren. Mit Blick auf die Anzahl der zu verbauenden Steine und die Bauzeit selbst muss es eine Art „Just-in-time"-Prinzip zwischen Steinbruch, Transporthafen, Zwischenlager und Baustelle selbst gegeben haben. Leider liegen aus der 3. und 4. Dynastie keinerlei „Bauberichte" vor. Erst gegen Ende der 5. Dynastie ist aus einer Darstellung im Grab des königlichen Baumeisters Sndm-jb Int bekannt, dass er u.a. den Plan für den Pyramidenbezirk des Königs Djedkare Asosi erstellt hat[4].

Mit Blick auf die Lebenserwartung der damaligen Herrscher dürfte es zeitlich sehr enge Vorgaben und Zeitpläne für die Errichtung der Pyramidenkomplexe gegeben haben, sodass verschiedene Arbeiten zeitlich parallel ausgeführt werden mussten.

Eine Fülle von Informationen und Darstellungen über handwerkliche Tätigkeiten ist aus den Gräbern verschiedener Privatleute – oft Vertraute des Königs – überliefert. Aus vielen Reliefdarstellungen kann in Verbindung mit archäologischen Funden der Gebrauch heute vergessener Techniken erkannt und wieder gefunden werden. Die sich daraus ergebenden und im AR genutzten Bautechniken werden nachstehend im Einzelnen unter Bezug auf die entsprechenden archäologischen Befunde und Quellen beschrieben.

Ausführliche Untersuchungen von Stocks am Sarkophag des Cheops, der erstmals in der Geschichte des AR aus Granit bestand, ergaben, dass für die äußere Formgebung *Kupfersägen* unter Beimischung von Sand als Schleifmittel verwendet wurden[5]. Stocks führte darüber hinaus verschiedene eigene Untersuchungen mit Sägen durch. Eine sehr ausführliche und mit vielen Darstellungen sowie Belegen versehene Veröffentlichung seiner Versuche und Beobachtungen beinhaltet umfangreiches Material zur Steinbearbeitung[6].

[3] F. Arnold, The Control Notes and Team Marks (New York 1990) 14
[4] R. Stadelmann, Die großen Pyramiden von Giza (Graz 1990), 248
[5] D.A. Stocks, Stone sarcophagus manufacture in Ancient Egypt, Antiquity 1999, 918–922
[6] D.A. Stocks, Experiments in Egyptian Archaelogy. Stoneworking technology in Ancient Egypt (London 2003)

Bohrer sind aus verschiedenen Darstellungen aus der Zeit des AR bekannt. So weist Borchardt auf die Abbildung eines Bohrers aus der 4. Dynastie zum Aushöhlen von Gefäßen hin. Dieser besteht aus einem unten gegabelten Stiel, in den je nach gewünschtem Durchmesser ein Feuerstein unterschiedlicher Länge eingesetzt wird. Am oberen Ende befinden sich eine gebogene Kurbel zum Drehen und zwei mit Stricken befestigte Steine, die gleichzeitig Auflast und Schwungrad bilden. Bei gleichmäßigem Druck zentrieren die Schwungsteine die Triebstange sehr genau. Die Darstellung eines Handwerkers im Grab des Ti in Saqqara zeigt einen derartigen Bohrer (Abb.1).

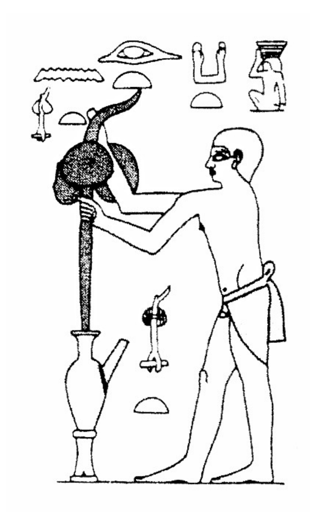


Abb. 1 Umzeichnung einer Handwerkerdarstellung aus dem Grab des Ti in Saqqara nach Steindorff[7]

Die einfachste Hebeeinrichtung, die seit dem AR archäologisch belegt ist, besteht aus der Verwendung eines Balkens aus Holz. Dabei ist es möglich, mittels des längeren Teiles des Hebels ein am kürzeren Teil anliegendes großes Gewicht mit vergleichbar kleiner Kraftanstrengung zu bewegen. In den Steinbrüchen in Gisa wurden damit die Steine herausgehebelt. Für die Verlegung und das Einpassen der Steinblöcke des Kernmauerwerks und des Verkleidungsmauerwerks der Pyramiden wurde dasselbe Verfahren angewandt.

Die Konstruktionen der Bohrer und der Einsatz von Balken zeigen, dass bereits im AR das ***Prinzip der Kurbel sowie der Walze*** und damit die ***Kraftverstärkung*** bekannt waren und eingesetzt wurden.

Auch das ***Absenken*** und ***Anheben*** schwerer Lasten ist im Alten Ägypten vielfach belegt: Als ältester archäologischer Beleg zum Aufrichten von Bauteilen mittels Seilumlenkung gilt der Fund einer steinernen Seilumlenkeinrichtung im Areal des Taltempels (Hafenanlage?) des Mykerinos aus dem **Alten** Reich (Abb.2): [8]

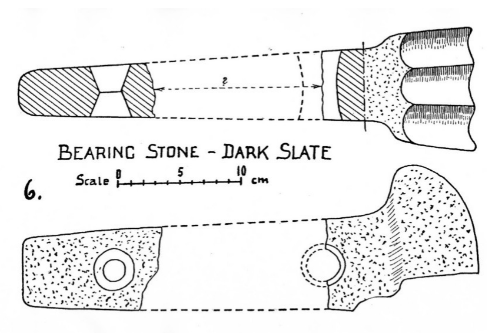


Abb. 2 Steinerne Seilumlenkeinrichtung

---

[7] G. Steindorff, Das Grab des Ti (Leipzig 1913) Taf.134

[8] G.A. Reisner, Mycerinos, The temples of the Third Pyramid at Giza, Havard University Press, Cambridge, 1931, p.276, pl.A

Eine denkbare Verwendung in einem Holzgestell schlägt Arnold vor.[9]

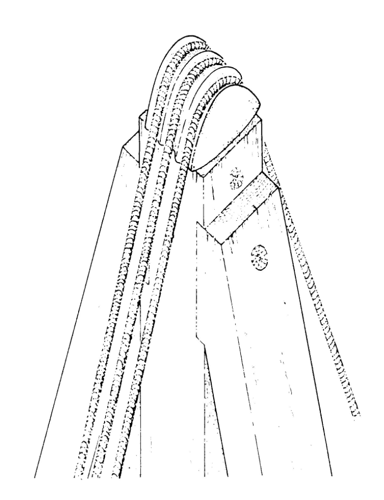


Abb. 3 Einsatz einer steinernen Seilumlenkeinrichtung nach Arnold

In der Fallsteinkammer der Cheopspyramide befinden sich in der oberen Hälfte auf der Westseite drei halbkreisförmige Vertiefungen, in denen Holzwalzen zum Anheben bzw. Herblassen der Fallsteine auflagen (Abb.4):



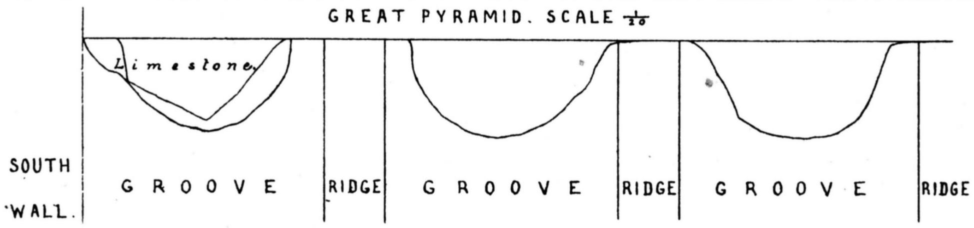


Abb. 4 Vermessung der Vertiefungen in der Fallsteinkammer der Cheopspyramide nach Petrie (verkleinert)[10]

Für das **Alte Reich** ist damit aufgrund der archäologischen Befunde nachgewiesen, dass es mit der in halbrunde Vertiefungen eingelegten Walze (Abb.4) und mit nicht beweglich angeordneten Seilumlenkeinrichtungen entsprechend Abb.2 bzw. 3 die Möglichkeit der Kraftumlenkung gab. Andererseits sind bewegliche Scheibenräder aus der Zeit der 5. Dynastie belegt. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass es auch bereits im AR bewegliche Seilrollen aus Holz und das Prinzip der Seilwinde gab. Die Anwendung des Prinzips des Flaschenzuges ist im AR zwar nicht belegt, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.[11]

In einem Grab in Lischt-Nord wurden drei hölzerne Seilrollen für die Führung von je zwei Seilen gefunden (unveröffentlichte Angaben; Abb.5), die von Arnold ursprünglich in die späte 12. Dynastie und damit ins **Mittlere Reich** datiert werden.[12] Danach dienten sie zum Absenken einer Kalksteinplatte, die zwei Bohrungen zur Befestigung der Seile hatte. Damit ist zum ersten Mal die Seilumlenkung mittels einer auf einer Walze drehbar angeordneten Rolle nachgewiesen. Die heute im Metropolitan Museum in New York befindliche Seilrolle wird in der Beschreibung in die 19. bis 20. Dynastie datiert.[13]

[9] D. Arnold, Building in Egypt, Oxford University Press 1991, S.283
[10] W.M.F. Petrie, Pyramids and Temples of Gizeh (London 1883) Taf.XII
[11] R. Stadelmann, Die großen Pyramiden von Giza (Graz 1990), S.135.
[12] D. Arnold, Building in Egypt, Oxford University Press 1991, S.71; S.103 mit Anm. 56 (Text bezieht sich auf Am. 55).
[13]http://www.metmuseum.org/works_of_art/collection_database/egyptian_art/block/objectview.aspx?collID=10&OID=100027095 (Abruf 24. Oktober 2010, 11.30 Uhr).



Abb. 5 Holzrolle mit zwei Führungsrillen für Seile (12. bzw. 19./20. Dynastie).

Mit derartigen Rollen lässt sich das Prinzip des Flaschenzugs realisieren.

Weitere vergleichbare Seilrollen – auch größeren Formats - sind aus dem **Neuen Reich** bekannt (Abb. 6).[14] In einem anonymen Grab (Nr. 1353) aus der 18. Dynastie in Deir el-Medine wurde eine ebenfalls auf einer Walze drehbar angeordnete Seilrolle bzw. Winde mit einem Seil aus Palmfasern gefunden.

Für die Seilumlenkung wurde auch eine im Pyramidenbezirk des Djoser in Saqqara gefundene Seilrolle aus Holz – wiederum auf einer Walze drehbar angeordnet – eingesetzt, die Lauer beschreibt (Abb.7):[15] Clarke und Engelbach vertreten dazu die Auffassung, dass diese Umlenkrolle aus der römischer Zeit stamme[16]. Arnold ordnet sie der Saïtenzeit zu.[17]



Abb. 6 Seilrolle bzw. Winde (18. Dynastie)

Auf einem Rundholz von ca. 8 cm Durchmesser drehbar angeordnet diente sie als eine Art Lager für ein umzulenkendes Seil. Das Rundholz selbst war vermutlich links und rechts der Seilrolle abgestützt, sodass sich für nachstehend aufgeführte Berechnung eine lichte Weite von ca. 60 cm ergibt.

---

[14] B. Bruyère Les Fouilles Deir el Médineh 1933-1934, Cairo, Institut Français, 1937 , S.122, fig.54.
[15] J.-P. Lauer, La Pyramide à Degrés . Band 1: L'architecture. Texte, Kairo 1936, S.52
[16] S. Clarke und R. Engelbach, Ancient Egyptian Masonry, Oxford University Press, London, 1930, S.44, FN 2.
[17] D. Arnold, Building, in Egypt, Oxford University Press 1991 S.71.

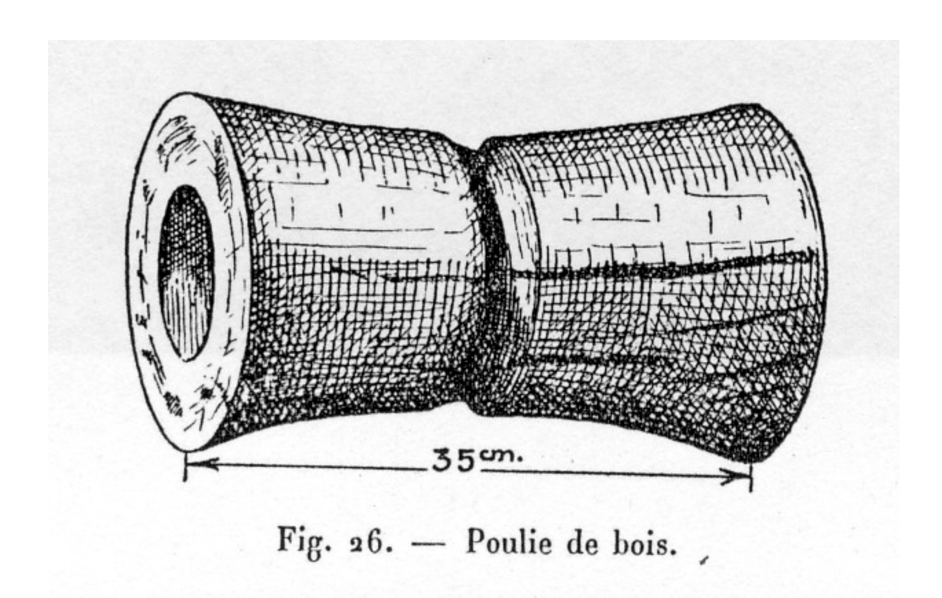


Abb. 7 Seilrolle aus dem Bereich der Pyramide des Djoser

Für die Berechnung der mit einem Seil über diese Seilrolle umzulenkenden Kraft wird von einer Belastungsobergrenze (maximale Biegespannung, Biegungsfestigkeit) von 1000 kg/cm² für Hartholz[18] bzw. von 750 kg/cm² für Holz der Nilakazie[19] ausgegangen. Wegen der Breite der Seilrolle und deren gleichmäßiger Auflage auf dem Rundholz kann man einen Gesamtdurchmesser von ca. 10 cm annehmen. Bei einem minimal erforderlichen Widerstandsmoment von 125 cm³ ([Radius 5 cm]³) in der Mitte der Seilrolle berechnet sich dann für Hartholz bzw. für Holz der Nilakazie ein Biegemoment von 125000 bzw. 93750 kgcm.[20] Daraus lässt sich die umzulenkende Kraft mit maximal 4167 kg bzw. 3125 kg ermitteln.[21] Für eine Umlenkrolle mit innerer Walze und einem angenommen Durchmesser von 15 cm ergeben sich die maximal umzulenkenden Kräfte mit 14 067 bzw. 10547 kg.

Derart gestaltete Seilrollen in unterschiedlichen Ausführungen (Abmessungen) wurden im Alten Ägypten für die Umlenkung auch großer Kräfte bzw. Lasten auf schiefen Ebenen eingesetzt. Der Einsatz von Walzen zum kontrollierten Herablassen von Blockiersteinen begegnet uns bei der Cheopspyramide zum ersten Mal. In der Fallsteinkammer der Pyramide des Mykerinos wurde dasselbe Prinzip verwendet.

Die Verwendung von Seilumlenkwalzen ist daher in die Überlegungen für das Heben und Senken von Lasten sowie den Transport über schiefe Ebenen mit einzubeziehen. Bisher wurde dieser Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen archäologischen Belegen nicht hergestellt. Damit wird deutlich, dass im AR zumindest ab der 4. Dynastie ein gut funktionierendes System von Hebewerkzeugen existierte. Die Errichtung der Giebeldächer in der Cheopspyramide sowie der in offener Bauweise angelegten Grabkammern der Pyramiden der 5. und 6. Dynastie – vielleicht auch schon des Giebeldachs der Grabkammer in der Pyramide des Djedefre in Abu Roasch – sind ohne den Einsatz von Hebeeinrichtungen in Verbindung mit der schiefen Ebene kaum vorstellbar.

Materialtransporte erfolgten auf ***ebener Fläche*** mittels Schlitten. So sind aus Beamtengräbern des AR verschiedene Bilddarstellungen bekannt, auf denen der Transport von Statuen und Gütern auf Schlitten gezeigt wird. Beispielhaft dafür sei der Transport einer Statue aus dem Grab des Hetepherachti[22], eines

[18] A. dos Santos, Theorien zur Bautechnik der Großen Pyramide, in: Kemet 7, Heft 3 (1998), S.27ff.; Croon beziffert die Biegungsfestigkeit von afrikanischem Bulletrie-Holz auf ca. 2000 kg/cm²

[19] L. Croon, Lastentransport beim Bau der Pyramiden, Dissertation, Buchdruckerei des Stephanstifts, Hannover, 1925, S.42ff.

[20] Biegemoment = Widerstandsmoment multipliziert mit der Biegungsfestigkeit.

[21] Die maximal umzulenkende Kraft ergibt sich aus der Division der Biegefestigkeit (125000 bzw. 93750 kgcm geteilt durch die halbe Länge der lichten Weite (30 cm).

[22] H.T. Mohr, The Mastaba of Hetep-her-Akhti (Leiden 1943) 39, Fig.3

hohen Offiziers aus Memphis (5. Dynastie). In dieser Darstellung (Abb.8) ziehen zwei Rinder die auf einer (Holz?)-Unterlage stehende und ebenfalls gegen Umstürzen bzw. Verschieben gesicherte Statue.

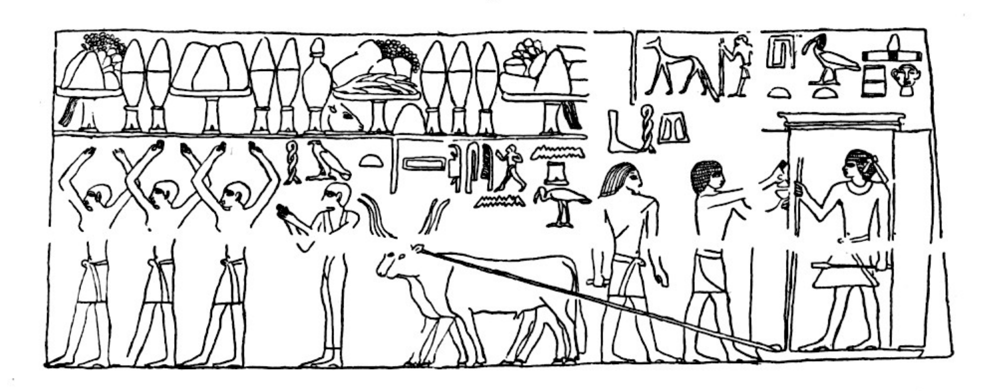


Fig. 3

Abb. 8 Transport einer Statue mittels Ochsengespann; Grab des Hetepherachti.

Eine der ***Grundregeln ägyptischer Bautechnik*** bestand darin, größere und schwere Steinblöcke zum Ort der Verbauung immer nur zu ziehen und nicht hochzuheben. Dies galt sowohl für den Transport zur Baustelle als auch für das Einbringen in das Bauwerk. Die Schiefe Ebene (Rampe) fand vielfältige Anwendung. Sie ist als Transportrampe zwischen Steinbrüchen und dem Bauplatz der Pyramiden und bei den Aufwegen im AR vielfach belegt.

Für das Ziehen von Lasten auf Rampen durch Zugmannschaften oder Tiere ist Voraussetzung, dass die Haftreibungskraft R (μ [Haftreibungszahl][23] $\cdot Q \cdot \cos \alpha$) größer als die Hangabtriebskraft ist, damit bei einer kurzen Pause der Zugmannschaft oder beim Reißen eines Zugseils der Schlitten automatisch zum Stehen kommt und nicht die Rampe rückwärts rutscht (Abrutschsicherheit).

Die Haftreibung des zu transportierenden Gegenstandes, die von der Beschaffenheit der Kontaktflächen und der Normalkraft, die der Gegenstand auf die Unterlage ausübt, abhängt, muss etwa 20% größer als die Gleitreibung sein. Durch eine zusätzliche Schubkraft oder durch ein Anhebeln kann sie jedoch einfach überwunden werden.

Damit ergibt sich unter Berücksichtigung der für den Steintransport auf Rampen mit Sand- bzw. Schotterbelag anzusetzenden Gleitreibungszahl eine maximale Neigung der Rampe von ca. 15°.[24] Transportrampen mit einer geringeren Gleitreibungszahl (glatte Steinoberfläche, nasser Untergrund oder quer zur Zugrichtung verlegte Rundhölzer[25] zum Ziehen großer Lasten mit Ochsengespannen) müssen mit Blick auf die genannte Abrutschsicherheit Neigungswinkel unterhalb von 8° besitzen. So beträgt der Neigungswinkel der Rampe zum Totentempel des Mykerinos etwa 7°. Der Aufweg zwischen Taltempel des Chephren und dessen Pyramide hat einen solchen von 6°[26] und der Neigungswinkel der von Süden aus dem Steinbruch kommende und auf die Cheopspyramide zuführende Rampe beträgt 6° (Steigung ca. 10%).[27] Der Transport der bis zu 200 t schweren Steinblöcke zum Totentempel des Mykerinos und der bis zu 425 t schweren Steinblöcke zum Totentempel der Pyramide des Chephren[28] erschient auf diese Weise mit Ochsengespannen ohne weiteres möglich: Es konnte jederzeit eine Ruhepause eingelegt werden, ohne dass eine gefährliche Situation entstand. Die Haftreibung verhinderte ein Zurückrutschen der Steine.

[23] Die Haftreibungszahl beträgt für eine glatte Oberfläche bei Holz auf Stein 0,6 und bei Stein auf Sand und Kies 0,3.
[24] F. Dörnenburg, Pyramidengeheimnisse? Enträtselte Mysterien, Patrik Brose, München, 2008 , S.148
[25] Ähnlich wie Eisenbahnschwellen liegen auch Rundhölzer stabil in einem Schotterbett (Kalksteinspitter, kleinere Steine) und können eine große Last tragen, da der Schotter durch Verkanten der Steine einen stabilen Untergrund darstellt und auch nicht zur Seite wegrutscht.
[26] D.A. Stocks, Das Bewegen schwerer Steinobjekte im Alten Ägypten, in: Sokar 15 (2/2007), S.74ff.
[27] M. Lehner, The Development of the Gisa Necropolis: The Khufu Project, MDAIK 1985, S.127
[28] V. Maragioglio – Rinaldi, C.A. 1966. L'Archittetura delle Piramidi Menfite, Band 5. (Turin 1966), S.64ff.

Abgesehen von den senkrecht auf die kleinen Schichtpyramiden in Lischt, Meidum und Sinki zulaufenden Baurampen aus Nilschlammziegeln konnten bisher bei keiner anderen Pyramide Rampen für den direkten Bau des Pyramidenkörpers – abgesehen von Transportrampen zum Bauplatz – archäologisch nachgewiesen werden. Es wurden auch keine entsprechenden Mengen eines Rampenmaterials in den Nekropolen – auch nicht bei den nur begonnenen und nicht zu Ende gebauten Pyramiden – gefunden[29]. Eindeutig identifizierte Schutthalden im Umfeld der Pyramiden in Gisa bestehen im Wesentlichen aus einem Gemisch aus Kalksteinfragmenten, Gips und Tafla ohne sichtbare Nilschlammanteile und werden als Materialabfall, der beim Bau der Pyramiden entstand, gedeutet[30].

Aus diesen archäologischen Gegebenheiten muss der Schluss gezogen werden, dass es eine Bauweise für die Pyramiden im AR gegeben hat, die ohne von außen senkrecht auf den Baukörper zulaufende und ständig zu erhöhende Rampen mit dem entsprechend großem Materialaufwand auskommt.

Steile Rampen mit einem Neigungsverhältnis von 2:1 (26º 33' 54“) mit nur geringen Abweichungen von der exakten Gradzahl werden bei den Pyramiden der 4.Dynastie für abwärts- und aufwärts gerichtete Korridore innerhalb der Pyramiden verwendet und sind somit im AR belegt[31]. Für den Steintransport scheiden Zugmannschaften oder Ochsengespanne als Zugkräfte in diesen Fällen aus.

Ein Beispiel für eine Rampe mit dem Steigungsverhältnis von 2:1 aus dem AR zeigt auch eine Abbildung in der Mastaba Debeheni in Gisa aus der frühen 5. Dynastie (Abb. 9).[32]

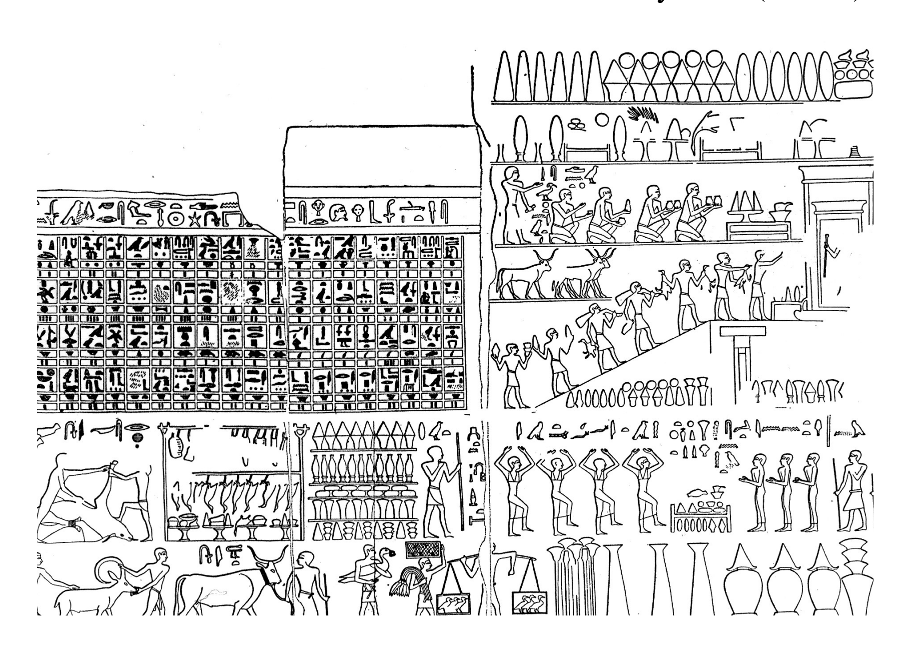


Abb. 9 Umzeichnung einer Rampe aus dem Grab des Debeheni nach Hassan

Eine weitere interessante Rampendarstellung aus der 18. Dynastie ist im Grab des Rechmire (TT 100 in Theben West) erhalten (Abb.10): Darin werden in der rechten Bildhälfte drei Mauern (oder Säulen) dargestellt, deren Abstände mit Ziegeln aufgefüllt sind. Von links führt eine Rampe auf das im Bau befindliche Gebäude zu, über welche Steinblöcke für die nächste Lage nach oben transportiert werden. Die Neigung der Rampe beträgt 10:5 bzw. 2:1 (26,5º).

[29] R. Stadelmann, Die ägyptischen Pyramiden (Mainz 1997), S.226
[30] M. Lehner The Development of the Gisa Necropolis: The Khufu Project, MDAIK 1985, S.124 und 132.
[31] J. Becker, Die Funktion der Pyramidenkorridore als vermessungstechnische Einrichtungen, Sokar 1/2003 14–21
[32] S. Hassan, Excavations at Giza, 1932–1933, Band 4, (Cairo 1943), Fig. 122

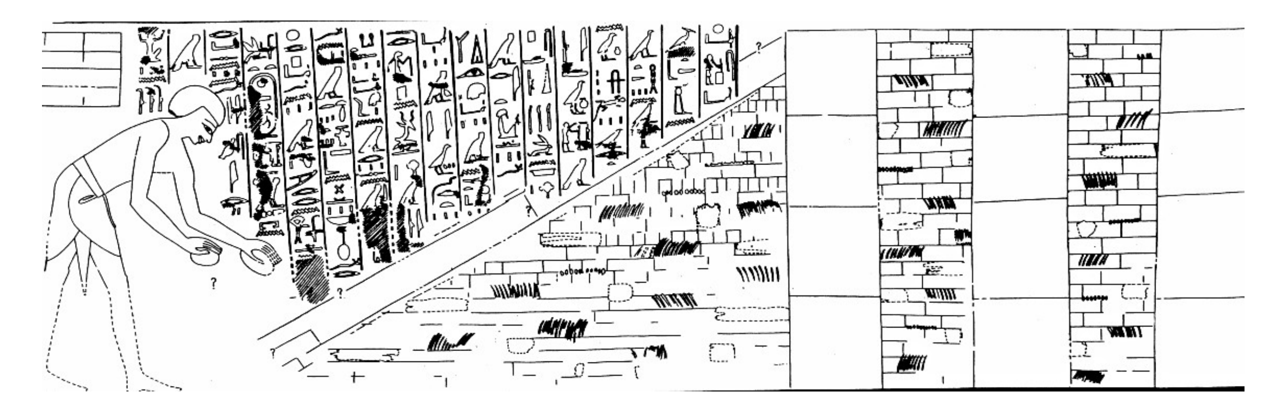


Abb. 10 Umzeichnung einer Ziegelbaurampe aus dem Grab des Rechmire[33]

Archäologische Befunde an den Pyramiden des Alten Reiches

Die ***Pyramide des Djoser*** wurde – ausgehend von einer zuerst errichteten Mastaba – in mehreren Schritten als Schichtpyramide mit zwei Schichten je Stufe gebaut. Die grundlegenden Bauverfahren der Schichtpyramiden wurden während dieser Zeit entwickelt: Um einen Kern wurden Steinschichten mit nach innen geneigten Steinlagen angefügt. Die Pyramidenstümpfe der von den Königen Sechemchet und Chaba (?) begonnenen Bauwerke sowie die kleinen Pyramiden (Huni?) folgten diesem Bauprinzip. Geglättete Außenverkleidungen wurden nicht nachgewiesen[34].

Auch die erste ***Pyramide des Snofru in Meidum*** wurde als Schichtpyramide in mehreren Bauphasen errichtet. Dabei wurden die sichtbaren Außenflächen der Stufen der Bauphasen E 1 und E 2 in Kalkstein ausgeführt und geglättet. In der letzten Bauphase wurde die Stufe E 2 mit einer weiteren Schicht (E 3) mit gleich bleibender Steigung ausgefüllt und mit feinkörnigem Kalkstein verblendet. Der Wechsel von der äußerlich sichtbaren stufenförmigen Schichtpyramide zur Pyramide mit einer von außen gesehen gleich bleibenden Neigung fand hier – parallel zum Bau der Knickpyramide – statt. Auch die Kultpyramide in Meidum wurde als Schichtpyramide errichtet.

Über die Bauweise der ***Knickpyramide*** und ihre innere Struktur kann keine archäologisch fundierte Aussage getroffen werden. Nachdem der Bau nur etwa 12–15 Jahre nach Baubeginn der Pyramide in Meidum begonnen wurde und zu diesem Zeitpunkt dort offensichtlich keine grundsätzlichen Schwierigkeiten mit dem Bauprinzip der Schichtpyramiden aufgetreten waren, spricht viel dafür, dass auch der Bau der Knickpyramide nach diesem Prinzip begonnen wurde. Die Knickpyramide erhielt nach Fertigstellung der ersten Baustufe eine weitere Außenverkleidung mit gleich bleibender Steigung in der unteren Hälfte. Nach Anbringen dieser zusätzlichen äußeren Schale erfolgte der Weiterbau der Pyramide ab einer Höhe von 90 Ellen/47 m mit einem geringerem Neigungswinkel. Dabei ist auch eine Änderung der Bauweise festzustellen: Die Steinlagen unter der Verkleidungsschicht wurden nach oben zunehmend weniger schräg nach innen und mehr und mehr horizontal verlegt. Die verwendeten Steine hatten ein wesentlich kleineres Format als die bei der nachträglich angebrachten äußeren Schale im unteren Bereich.

Der Bau der Nebenpyramide der Knickpyramide erfolgte nach eben diesem „neuartigen“ bzw. geänderten Bauprinzip horizontal verlegter Steinschichten und kann durchaus als „Test“ für die Bauweise nachfolgender Pyramiden mit horizontal verlegten Steinen angesehen werden.

Der Wechsel vom Prinzip der schräg nach innen geneigten Steinlagen, wie es für die Schichtpyramiden typisch ist, hin zur Bauweise mit horizontal verlegten Schichten, die wiederum für die weiteren

[33] N. de Garis Davies, The Tomb of Rekh-mi-Re at Thebes, Band 2. Publications of the Metropolitan Museum of Art: Egyptian Expedition Band 11. (New York 1943) Pl.17 .
[34] Eine Ausnahme bildet die Verkleidung der untersten Stufe der kleinen Pyramide in Saujet el-Meitin.

Pyramiden der 4. Dynastie typisch ist, fand wahrscheinlich während der Regierungszeit des Snofru beim Bau der oberen Hälfte der Knickpyramide, deren Kultpyramide und der Roten Pyramide statt. Die Ursachen dafür sind in den bautechnischen Schwierigkeiten bei der Errichtung der Knickpyramide zu suchen.

Die ***Rote Pyramide*** weist erstmals horizontal verlegte Steinschichten des Verkleidungsmauerwerkes auf. Wegen dessen guten Erhaltungszustandes ist wie bei der Knickpyramide wiederum keine archäologisch belegbare Aussage über die Struktur des dahinterliegenden Kernmauerwerkes möglich. Es ist jedoch aufgrund der negativen bautechnischen Erfahrungen und Änderungen beim Bau der Knickpyramide unwahrscheinlich, dass das Kernmauerwerk aus geneigten Schichten besteht. Bei der Roten Pyramide findet ein signifikanter Wechsel zu dem großformatigen Mauerwerk, wie es bei den Pyramiden in Gisa seinen Höhepunkt erreicht, statt. Parallel dazu müssen auch neu entwickelte Verfahren für den Materialtransport eingeführt worden sein. Der – bezogen auf die bisherigen Regierungsjahre des Snofru – späte Beginn des Baus der Roten Pyramide und die daraus sicherlich an die Baumeister ergangene Vorgabe, mit einer möglichst kurzen Bauzeit auszukommen, könnte auch mit zur Verwendung größerer Steine und damit zu neuen Bauverfahren geführt haben. In dieser Epoche einer intensiven Pyramidenbautätigkeit wurden mit Sicherheit auch weitere bautechnische Erfahrungen gemacht, die beim Bau der folgenden großen Pyramiden Anwendung fanden. Es bietet sich daher die Schlussfolgerung an, dass das Mauerwerk der Roten Pyramide aus Stufen mit horizontaler Steinverlegung besteht und damit die Bauweise der Stufenpyramiden ihren Anfang nimmt.

In der Fachwelt wird meist nur vom Wechsel von der „Stufenpyramide“ (fälschlicherweise gebrauchter Ausdruck für Schichtpyramide) hin zur „echten“ Pyramide während der Herrschaft des Snofru gesprochen, ohne dass man sich jedoch über die bautechnischen Gegebenheiten im Klaren zu sein scheint. In etwa 80 Jahren nach dem Bau der ersten Pyramide des Djoser entwickelte sich die „klassische“ Pyramidenform als königliches Grabmal, die in den kommenden Jahrhunderten weitgehend das Aussehen der Nekropolen bestimmen sollte. Eine Entwicklung im ägyptischen Grabbau von der ersten Ziegelmastaba über die Schichtpyramide hin zur Stufenpyramide mit ihrer Verkleidung mit konstanter Neigung fand damit ihren Abschluss.

Die Beobachtungen an der Bresche in der Südseite und im Grabräubergang der Nordseite der Cheopspyramide sowie an der Bresche auf der Nordseite der Pyramide des Mykerinos (Abb.11) zeigen, dass die horizontal mit Steinen gleicher Höhe verlegten Schichten des Verkleidungsmauerwerks nicht mit der inneren Struktur des Kernmauerwerkes übereinstimmen. Dieses besteht bei beiden Pyramiden innerhalb der äußeren Mauer der einzelnen Stufen aus unregelmäßig behauenen Steinen ganz unterschiedlicher Formate, die unsystematisch übereinander angeordnet und mit Mörtel verbunden sind. Zum Teil handelt es sich um Bruchsteine.

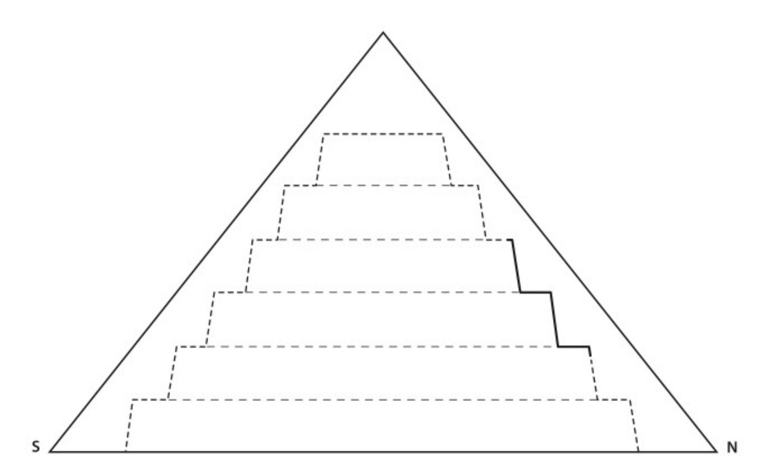


Abb. 11 Schnitt S–N der Pyramide des Mykerinos mit den archäologisch belegten Stufen in der Bresche der N-Seite (durchgezogene Linien) und den weiteren, rekonstruierten Stufen des Kernmauerwerks in gestrichelter Darstellung

Herstellung, Transport und Verlegung des Steinmaterials des Kernmauerwerkes erforderten auch einen geringeren Aufwand als beim Verkleidungsmauerwerk. Die Stabilität des Bauwerkes – auch gegen äußere Erschütterungen – wurde durch die stufenförmige Kernmauerstruktur erhöht. Über die innere Baustruktur der Pyramide des Chephren kann mangels archäologischer Befunde keine zuverlässige Aussage getroffen werden.

Dem genauen Verlegen und Vermessen der Fundamente der Außenverkleidung kommt eine ganz besondere Bedeutung zu. Nur so konnte sichergestellt werden, dass sich die vier Eckkanten auch tatsächlich in der Pyramidenspitze treffen. Eventuell notwendige Feinkorrekturen sind dann bei Bau der nächst höheren Steinschicht möglich. Die exakte Vermessung der Basis der Cheopspyramide zeigt trotz des im Inneren vorhandenen Felssporns – also ohne Diagonalmessung –, dass diese Art der Vermessung offensichtlich kein Problem darstellte.

Durch Vermessen der Seitenlängen einer fertig gestellten Steinschicht der Außenverkleidung des Pyramidenstumpfes von Eckstein zu Eckstein mittels Messstäben („Längenmessung“) und Kontrolle der waagerechten Verlegung („waagerechte Nivellierung“) sowie der Peilung einer Geraden zwischen den genau rechtwinklig und mit der festgelegten Neigung der Eckkante vorgefertigten Ecksteinen entlang der Kennzeichnungen der Außenkanten auf der Oberseite der Steine der Außenverkleidung konnte sichergestellt werden, dass die Pyramide ohne Verdrehungen und Verkantungen errichtet werden konnte.[35]

Eine Ausrichtung nach den Himmelsrichtungen während des Baus, durch die eine Verdrehung des Baukörpers hätte kontrolliert werden können, ist nicht nachgewiesen und auch aufgrund der bisher bekannten bzw. vorgeschlagenen Messverfahren unwahrscheinlich.

Die Fundamente der äußeren Verkleidungsschicht wurden stets sehr genau nivelliert und vermessen. Gleiches gilt für die weiteren Steinlagen der äußeren Verkleidungsschicht und deren jeweiligen Rücksprung. Für die Realisierung eines stets gleich großen Rücksprungs war die Einhaltung einer gleich bleibenden Höhe der einzelnen Stufen entscheidend. Entsprechend dem Abbau in den Steinbrüchen entstanden Steinlagen unterschiedlicher Höhe. Nur durch die exakte Einhaltung des vorgegebenen Rücksprungs war es möglich, den angestrebten Neigungswinkel – und damit auch die Höhe der Pyramide – auch bei unterschiedlichen Stufenhöhen exakt einzuhalten. Die leicht unterschiedlichen Neigungswinkel verschiedener Pyramiden können in einer unterschiedlichen Bauvorgabe liegen und sind vielleicht auch auf kleinere Messungenauigkeiten beim Bau der Verkleidungsmauerwerks zurückzuführen. Die tatsächliche Pyramidenhöhe war keine exakte Planungsvorgabe; sie ergab sich durch den realisierten Rücksprung über alle Stufen aufaddiert dann von selbst.

Auch in der 5. und 6. Dynastie wurde an der Stufenbauweise des Kernmauerwerkes der Pyramiden festgehalten. Bei allen Pyramiden dieser Zeitepoche ist dies archäologisch belegt. Dies gilt auch für die Bauweise der einzelnen Kult- und Königinnenpyramiden. Mit dem Bau der Pyramiden des Mykerinos und des Userkaf beginnt eine Reihe von Pyramidenbauten kleinerer Abmessungen im Vergleich zu denen der 4. Dynastie. Diese Entwicklung setzte sich bis gegen Ende der 6. Dynastie (Pepi II.) fort. Die Art und Weise, in der die Stufen errichtet wurden, änderte sich in der 5. und 6. Dynastie jedoch: Das Kernmauerwerk der einzelnen Stufen besteht aus einer mit gut bearbeiteten Steinen ausgeführten Außenmauer mit leichtem Rücksprung und im Inneren aus Blöcken unterschiedlichen Formats, die meist nicht exakt bearbeitet und mit größeren Mengen Gerölls und Mörtels verbunden sind. Diese Bauweise mit kleineren Steinformaten führte – im Vergleich zu derjenigen für die Pyramiden der 4. Dynastie – zu geringeren Kosten bei der Steingewinnung und beim Transport des Materials.

Das Verkleidungsmauerwerk, wie es bei den Pyramiden der 4. Dynastie zu beobachten ist und dort aus Lagen gut bearbeiteter und größerer Steinformate besteht, existiert in dieser Form nicht mehr. Der Zwischenraum zwischen den Stufen und der Außenverkleidung aus Kalkstein wird mit Steinen

---

[35] Müller-Römer, F. „Der Bau der Pyramiden im Alten Ägypten“, Utz-Verlag München; 2011, S.112ff.

kleineren und unregelmäßigen Formats ausgeführt bzw. damit einfach aufgefüllt. Dies hatte dann nach Abtragen der Außenverkleidung eine starke Verwitterung des Mörtels und ein Einstürzen von Teilen des Kernmauerwerkes zur Folge. Stadelmann, Lehner u.a. sprechen in diesem Zusammenhang von „schlampiger" Bauweise und Maragioglio/Rinaldi von schlechter Qualität des Mauerwerkes. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass diese Art der Bauweise vielmehr die Erfahrung im Pyramidenbau widerspiegelt, wonach bei kleineren Pyramiden eine stabile Außenverkleidungsschicht statisch durchaus ausgereicht hat, um den Kern vor wetterbedingter Erosion zu schützen. Es lag sicherlich auch ein Zuwachs an bautechnischer Erfahrung vor. Darüber hinaus wurde auch aus Zeit- und Kostengründen bei dem Bau dieser kleineren Pyramiden absichtlich nicht mehr ein so exakt gebautes Verkleidungsmauerwerk wie bei den Pyramiden der 4. Dynastie verwendet, welches dort auch nach Abbau der Außenverkleidung bis heute einer starken Erodierung und Verwitterung standhält.

Zusammenfassend als übereinstimmendes Merkmal der Bauweise der Pyramiden des AR ist festzustellen, dass alle Pyramiden – zumindest ab der Cheopspyramide – im Kernmauerwerk aus Stufen (Schicht- bzw. Stufenbauweise) bestehen.[36]

Im unmittelbaren Umfeld der Pyramiden vorhandene bzw. senkrecht auf diese zulaufende Baurampen, die nicht dem Transport von Steinen zur Baustelle sondern zum eigentlichen Pyramidenbau verwendet wurden, sind – eventuell mit Ausnahme bei der Pyramide des Snofru in Meidum – archäologisch nicht fassbar.

Die Pyramiden des AR wurden in einem Zeitraum von insgesamt ca. 400 Jahren geplant und gebaut. Dabei wurden unterschiedliche Bauweisen erdacht und ausgeführt. Die Bautechnik entwickelte sich in dieser Zeit stetig weiter.

Veröffentlichte Hypothesen zum Pyramidenbau

Die bisher veröffentlichten und wissenschaftlich ernst zu nehmenden Bauhypothesen beziehen sich fast ausschließlich auf den Bau der größten Pyramide, der Cheopspyramide. Es ist mit Blick auf die archäologischen Belege auszuschließen, dass sich während eines Zeitraumes von 400 Jahren (3. bis 6. Dynastie) mit insgesamt ca. 25 großen Pyramidenbauwerken die Bauverfahren – mit Ausnahme des Wechsels vom Prinzip der Schicht- zur Stufenpyramide unter Snofru – grundsätzlich geändert haben. Unter Berücksichtigung dieser Ausnahme hat es nur kontinuierliche Weiterentwicklungen der Bautechnik gegeben. Hypothesen für den Bau der Cheopspyramide müssen daher auch für alle nachfolgenden Pyramiden des Alten Reiches gelten.

Eine Analyse der bisher vorgelegten Hypothesen zum Pyramidenbau (Cheopspyramide) führt zu einer Einteilung in drei Kategorien:

- Hypothesen mit senkrecht auf die Pyramide zuführenden Rampen
- Hypothesen mit entlang der Pyramidenseiten geführten Rampen
- Einsatz von Hebegeräten bzw. Zugeinrichtungen

Erfüllt eine der Bauhypothesen die Eingangs aufgeführten Prämissen nur zum Teil oder überhaupt nicht, besitzt sie keine Beweiskraft und sollte in der künftigen ägyptologischen wissenschaftlichen Diskussion nicht weiter in Betracht gezogen werden.

Senkrecht auf die Pyramide zulaufende Rampen, wie von Arnold,[37] Stadelmann,[38] Lauer,[39] Lattermann[40] u.a. vorgeschlagen, müssen ***als Baumethode ausgeschlossen*** werden:

[36] Bei der Knickpyramide, der Roten Pyramide und der Pyramide des Chephren konnte dies bisher archäologisch noch nicht nachgewiesen werden.
[37] D. Arnold, Überlegungen zum Problem des Pyramidenbaus, MDAIK 1981, S. 15–28.
[38] R. Stadelmann, Die großen Pyramiden von Giza (Graz 1990), S. 248.
[39] J.-P. Lauer, Le Problème de la Contruction de la Grande Pyramide, RdE 1989, 91–111.

- Die Rampen müssten ständig erhöht und in ihrer Breite angepasst werden. Dies würde zu regelmäßigen Bauunterbrechungen – zumindest aber zu Beeinträchtigungen – führen, Nur von Beginn an entsprechend breit angelegte Rampen, die jeweils hälftig entsprechend Baufortschritt ohne Unterbrechung der Transportarbeiten erhöht werden zu könnten, wären geeignet.
- Die maximale Steigung der Rampen liegt in vielen Fällen über 7° bzw. 15°.
- Die Baumasse der Rampen wäre sehr groß und kann je noch Ausführung das Volumen der Pyramide selbst erreichen bzw. dieses übertreffen.
- Es liegen keine archäologischen Nachweise zu Rampenresten und größeren Schuttablagerungen abgebauter Rampen vor.
- Frei stehende Ziegelrampen aus luftgetrockneten Lehm- bzw. Nilschlammziegeln sind aus Gründen des Eigengewichtes nur bis zu einer Höhe von ca. 120 m geeignet.
- Eine schichtweise Verlegung der Steine im Inneren der Pyramide, wie sie bei dieser Art der Rampen vorgesehen wird, entspricht nicht den archäologischen Befunden der Stufenpyramiden, wie am Beispiel der Pyramide des Mykerinos deutlich wird.
- Die Verlegung des Verkleidungsmauerwerks und der Außenverkleidung sowie deren Glättung sind ohne außen angeordnetes Baugerüst bzw. ohne Umbauungen aus bau- und sicherheitstechnischen Gründen nicht durchführbar.

Spiralförmig angeordnete Rampen, wie von Goyon,[41] Lehner,[42] Klemm und Klemm,[43] Houdin[44] u.a. vorgeschlagen, müssen ***als Baumethode*** ebenfalls ***abgelehnt*** werden:

- Der Transport des Baumaterials um 90º an den Ecken der Pyramide – auch wenn diese abgeschrägt ausgeführt werden – erscheint nur schwer möglich und würde einen großen Zeitaufwand erfordern. Zur Frage der Kraftumlenkung der Zugkräfte fehlen Aussagen bzw. praktikable Vorschläge.
- Eine schichtweise Verlegung der Steine im Inneren der Pyramide entspricht nicht den archäologischen Befunden.
- Die Transportkapazität einer spiralförmig angeordneten Rampe führt zu Bauzeiten, die wesentlich über den belegten Bauzeiten liegen.
- Die Verlegung der äußeren Verkleidungsschicht und deren Glättung ohne außen angeordnete Baugerüste sind bei Integralrampen aus bau- und sicherheitstechnischen Gründen ebenfalls nicht durchführbar.
- Eine exakte Vermessung während des Baus ist bei außerhalb der Pyramide spiralförmig angeordneter Rampen schwierig, da Außenflächen und Ecken teilweise verdeckt sind. Die Einhaltung des stets gleich bleibenden Rücksprungs ist sehr erschwert.

Darüber hinaus lassen die Vorschläge für eine Bauweise mit Rampen sehr oft eine Berechnung der Transportkapazität aufgrund der vorgeschlagenen Bauhypothese im Verhältnis zur archäologisch belegten Planungs- und Bauzeit der Cheopspyramide von ca.. 23 Jahren vermissen.

Abzulehnen sind auch Vorschläge für senkrecht an die Pyramidenaußenflächen angelehnte ***Treppenkonstruktionen***, wie sie Arnold,[45] Isler[46] und Graefe[47] vorschlagen. Diese sind wegen der außerordentlich großen Steigung für den Transport des Steinmaterials (Hochhebeln der Steine) als sehr problematisch und als nicht praktikabel einzuschätzen.

---

[40] W. Lattermann, Der Bau der Cheopspyramide (München 2002) Eigenverlag.
[41] G. Goyon, Die Cheopspyramide (Augsburg 1990).
[42] M. Lehner, The Development of the Gisa Necropolis: The Khufu Project, MDAIK 1985, S.109 bis 143.
[43] R. Klemm – D. Klemm, Die Integralrampe als Konstruktionselement großer Pyramiden. Stationen. Beiträge zur Kulturgeschichte Ägyptens (Mainz 1998) 87–94.
[44] J.-P. Houdin, Cheops. Die Geheimnisse um den Bauprozess der Großen Pyramide (Mainz 2007).
[45] D. Arnold, Überlegungen zum Problem des Pyramidenbaus, MDAIK 1981 15–28.
[46] M. Isler, On Pyramid Building, JARCE 1985 129–142 und On Pyramid Building II, JARCE 1987 95–112.
[47] E. Graefe, Über die Determinanten des Pyramidenbaus bzw. Wie haben die Alten Ägypter die Pyramiden erbaut? unter: http://www.uni-muenster.de/IAEK/org/WMA/graefe/pyr/index.html.

Mehreren Hypothesen zum Pyramidenbau (Graefe, Landt[48], Hölscher) ist gemeinsam, von der archäologisch nachgewiesenen Stufenbauweise des Kernmauerwerks ausgehend ***Rampen*** anzunehmen, die ***parallel zur Seitenfläche der Stufen*** angeordnet sind und deren Steigung von der jeweils gewählten Transportmethode für das Steinmaterial bestimmt wird. Entsprechend der Größe der unteren Stufen des Kernmauerwerks können auf allen Seiten der Pyramide jeweils mehrere Rampen angeordnet und so insbesondere die großen Materialmengen im unteren Bereich der Pyramide zeitökonomisch transportiert und verlegt werden. Keyssner schlägt eine Umbauung der Pyramide mit einer Bauplattform in Stufen vor, auf der Seilwinden für das Hinaufziehen der Steine angeordnet sind.[49] Allerdings entspricht die in dieser Hypothese angenommene schichtweise Verlegung des Kernmauerwerks nicht den archäologischen Befunden einer inneren Stufenbauweise.

Die meisten der vorgelegten Bauhypothesen gehen von Zugkräften aus, die von Ochsengespannen bzw. von Menschen erbracht werden. Bei schweren Lasten und größeren Rampensteigungen ergeben sich dann große Gespanne bzw. Zugmannschaften sowie große Rampenlängen.

Manche der Vorschläge und Ideen für den Materialtransport beim Pyramidenbau lassen darüber hinaus Konstruktionen und Verfahren erkennen, die sehr kompliziert sind, sodass sich die Frage stellt, ob sie den Denk- und Vorgehensweisen der Baumeister im Alten Ägypten sowie den damaligen Baumethoden entsprechen. Sehr oft werden die Fragen des Baus der Pyramidenspitze, des Aufsetzen des Pyramidion und der Außenverkleidung sowie deren Glättung nicht oder nur unzureichend behandelt. Gleiches gilt für Fragen der Arbeitssicherheit. Daraus kann nur der Schluss gezogen werden, dass es eine Bauweise für die Pyramiden gegeben haben muss, die ohne eine von außen senkrecht auf den Baukörper zulaufende bzw. diesen spiralförmig umfassende Rampe mit einem entsprechend großen Materialaufwand bzw. ohne eine Treppenkonstruktion auskommt.

Die Kombination parallel zur Pyramidenseite angeordneter Rampen und Zugeinrichtungen mit Seilwinde bzw. Walze und des sich daraus ergebenden Einsatzes von Rampen mit einer wesentlich größeren Steigung liegt der neu entwickelten und im Folgenden beschriebenen Hypothese für den Bau der Pyramiden zugrunde. Dieser Bauvorschlag stützt sich ausschließlich auf archäologisch belegte bzw. aufgrund von Belegen gefolgerten Bauweisen bzw. Verfahren.

Pyramidenbau mit Rampen und Umlenkwalzen[50]

Ausgehend von den archäologischen Befunden soll am Beispiel der Pyramide des Mykerinos gezeigt werden, wie diese Pyramide errichtet werden konnte und welcher Zeitaufwand dafür erforderlich war. Die Pyramide des Mykerinos wurde ausgewählt, da bei ihr die Stufenbauweise und die Verlegungsart des Verkleidungsmauerwerks sowie der Außenverkleidung mit ihren Abmessungen deutlich zu Tage treten und archäologisch eindeutig fassbar sind.

Die nachfolgend beschriebene Hypothese zum Bau der Stufenpyramiden im AR am Beispiel der Pyramide des Mykerinos geht von ***mehreren Bauabschnitten*** aus, in denen der Bau der Pyramide im Wesentlichen wie folgt vorgenommen wurde:

- Im Inneren wird das ***stufenförmige Kernmauerwerk*** bis einschließlich der 6. Stufe errichtet. Der Steintransport erfolgt über steile Rampen mit einem Neigungsverhältnis von 2:1, die auf den Stufen des Kernmauerwerks zu diesen parallel und auf allen vier Seiten der Pyramide angeordnet sind. Die Rampen werden nach Abschluss der Arbeiten am Kernmauerwerk zurückgebaut.
- Daran anschließend wird von der untersten Schicht der Außenverkleidung ausgehend eine stufenförmige Umbauung der Pyramide als ***Arbeitsplattform***[51] errichtet, über die die Verlegung

[48] E. Landt, Ein neuer Kampf um die Cheopspyramide (Berlin 1923).
[49] H. Keyssner, Baustelle Giza. Kritische Untersuchung zum Bau der Cheopspyramide (Karlsruhe 2007).
[50] Müller-Römer, F. „Der Bau der Pyramiden im Alten Ägypten“, Utz-Verlag München; 2011, S.335ff.

des Verkleidungsmauerwerks, der äußeren Verkleidungsschicht (Backing Stones) und der Außenverkleidung in einem Arbeitsgang vorgenommen werden. Der Steintransport dafür erfolgt ebenfalls über steile Rampen mit einem Neigungsverhältnis von 2:1 auf den Stufen der Umbauung (Arbeitsplattform) auf allen vier Seiten der Pyramide.

- Nach Aufsetzen des Pyramidion wird der ***Rückbau*** der stufenförmigen Umbauung (Arbeitsplattform) bei gleichzeitiger Glättung der Außenverkleidung von oben nach unten vorgenommen.

Grundidee der Hypothese sind einmal der Bau des stufenförmigen Kernmauerwerks über steil angelegte Rampen unter Einsatz von Umlenkwalzen ***und*** zum anderen die Errichtung einer Umbauung der Pyramidenaußenfläche als Arbeitsplattform, um den Bau der Pyramidenspitze und die Verlegung sowie Bearbeitung und Glättung der Steine der Außenverkleidung ebenfalls über steil angelegte Rampen zu ermöglichen – in beiden Fällen zeitgleich auf allen vier Seiten der Pyramide. Damit wird die vollständige Errichtung der Pyramide einschließlich Aufsetzen des Pyramidion nach einem einheitlichen Bauverfahren möglich.

Durch Verwendung von Seilumlenkwalzen ist es möglich, auch schwere Lasten über steile Rampen nach oben zu transportieren, ohne dass dafür große Zugmannschaften benötigt werden. In der Kombination zweier archäologisch nachgewiesener Bautechniken – Rampe und Walze – liegt der Ansatz für den hiermit vorgestellten Vorschlag für den Pyramidenbau im AR.

Auf den ersten Blick erscheint es widersprüchlich, zwei voneinander unabhängige Rampensysteme zu errichten und im weiteren Verlauf der Bauarbeiten wieder abzubauen. Die archäologischen Befunde zeigen jedoch, dass das Kernstufenmauerwerk separat vom Verkleidungsmauerwerk errichtet wurde. Wie z.B. aus dem Bau der zwei der Königinnenpyramiden des Mykerinos, die nicht verkleidet wurden, ersichtlich, bestehen diese nur in Form des Kernmauerwerks. In der Bresche auf der Nordseite der Pyramide des Mykerinos wird zudem deutlich, dass die Steine des Verkleidungsmauerwerks an die Außenwand des Kernstufenmauerwerks angesetzt wurden. Eine schichtweise und zeitgleiche Verlegung des Kernmauerwerks und des Verkleidungsmauerwerks einschließlich der Außenverkleidung von nur einer Rampe aus ist somit auszuschließen. Der separate Bau des Kernmauerwerks mit einer gut gefügten Außenmauer und Füllmaterial im Inneren dürfte statisch bedingt sein, um bei Erschütterungen (Bodensetzungen, Erdbeben) Risse und Verwerfungen des Baukörpers zu vermeiden.

Wenn nach der hiermit vorgelegten Hypothese die Pyramide des Mykerinos erbaut werden konnte, so ist dieser Vorschlag prinzipiell auch für die Errichtung der anderen Stufenpyramiden des AR – mit individuellen Anpassungen – gültig.

Wie von den Königinnenpyramiden des Mykerinos bekannt ist, haben die Höhen deren einzelner Stufen etwa gleiche Abmessungen, wobei die untere Stufenhöhe geringfügig niedriger ist. Es werden daher bei der Pyramide des Mykerinos zwei Stufen unterhalb der Bresche angenommen. Die Gesamthöhe dieser beiden Stufen ist mit 16,39 m im Durchschnitt pro Stufe etwas kleiner als die der oberen Stufen und ist mit der Bauweise der Nebenpyramiden vergleichbar. Nach vorgenommener Rekonstruktion besteht das Kernmauerwerk aus sieben Stufen (Abb.12). Dabei werden die Höhen der Stufen 5–7 und deren Rücksprünge entsprechend der archäologisch nachgewiesenen Stufen 3 bzw. 4 angenommen (Höhe 8,5 m und Stufenbreite 4,2 m). Denkbar ist jedoch auch, dass die Stufe 7 nicht mehr aus einer äußeren Mauer mit Auffüllung des Innenraumes sondern aus gut behauenen Steinen besteht, die lagenweise unterschiedlich verlegt wurden, wie es in der Spitze der Cheopspyramide zu beobachten ist.

---

[51] Das Verlegen der Steine des Verkleidungsmauerwerks und der Backing Stones sowie das genaue Einpassen der schon zugeschnittenen Steine der Außenverkleidung erfordern aus Gründen der Arbeitsmöglichkeit von allen Seiten sowie der Arbeitssicherheit eine Umbauung der Pyramide mit einer Arbeitsplattform.

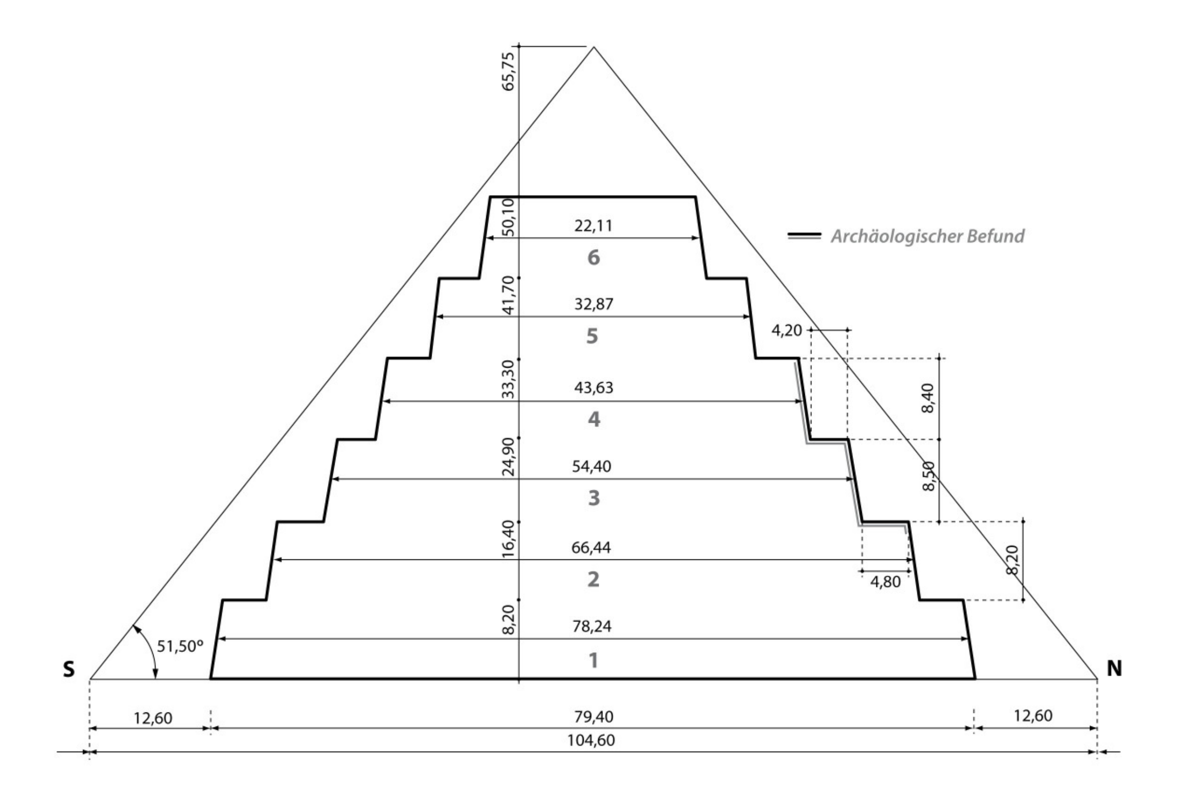


Abb. 12 die sechs Stufen des Kernmauerwerks der Pyramide des Mykerinos

Die einzelnen Bauabschnitte

Nach der Entscheidung über den Bau der Pyramide und nach der abgeschlossenen Bauplanung sowie der Auswahl des Bauplatzes wurde dieser planiert und ggf. an Stellen losen Gerölls mit Steinplatten unterfüttert. Die Transportwege von den zu erschließenden Steinbrüchen und vom neu gebauten Hafen zur Baustelle wurden festgelegt und ausgebaut. Weiterhin erfolgten die Vermessung der Kanten der unteren Stufe des Kernmauerwerks, die Ausrichtung der Pyramidenbasis nach Norden und deren Festlegung. Die Länge der Basiskante der unteren Stufe beträgt nach Maragioglio und Rinaldi ca. 80 m (150 Ellen?). Ebenfalls vermessen wurden die Basiskanten der untersten Schicht der Außenverkleidung mit den Abmessungen 196 x 200 Ellen (102,2 x 104,6 m). Parallel zu diesen Arbeiten erfolgten Festlegung und Baubeginn des Grabschachtes und der Grabkammern.[52] Nach Abschluss der Vorbereitungsarbeiten, wofür etwa ein Jahr anzusetzen ist, begannen die eigentlichen Bauarbeiten.

Bau des Kernmauerwerks

Der archäologische Befund der Stufen 2 bis 4 des Kernmauerwerks zeigt, dass Höhen und Breiten der Stufen nicht immer dieselben Abmessungen haben. Eine einheitliche „Fluchtlinie“ der Stufenkanten lässt sich mit 54°30´ nur grob feststellen; nicht alle Kanten werden davon erfasst. So liegt die Kante der dritten Stufe etwas innerhalb dieser Fluchtlinie. Auch bei den Königinnenpyramiden G III c und G III b sind derartige Unterschiede der Stufenhöhen und -breiten festzustellen. Der gleichmäßige Neigungswinkel der Pyramidenseiten wurde daher erst durch die exakte Verlegung des Verkleidungsmauerwerks unter Einhaltung stets des gleichen Rücksprungs sowohl an den Seitenflächen der Pyramiden als auch an den vier Kanten – ausgehend von den Basisblöcken der untersten Lage der Außenverkleidung. Das scheint auch der Grund dafür zu sein, warum der äußere Neigungswinkel (51º30´) stets etwas geringer ist als derjenige, der die Kanten der Stufen des

[52] Auf die Frage ob es sich mit dem später überbauten Zugang zur Vorkammer der Grabkammer um eine Erweiterung bzw. Änderung des ursprünglichen Bauplanes der Pyramide handelt oder ob dies ein Transportweg für die Granitplatten zur Verkleidung der Grabkammer war, wird nicht näher eingegangen.

Kernmauerwerks verbindet (54°30´) und damit von diesem unabhängig realisiert werden kann. Die Abmessungen der oberen Seiten der einzelnen Stufen des Kernmauerwerks müssen daher nicht so exakt wie die Ecksteine der äußeren Verkleidung positioniert werden.

Mit Beginn der Arbeiten wurden an allen Pyramidenseiten gleichzeitig die Steinreihen der untersten Stufe des Kernmauerwerks sowie das entsprechende Füllmaterial (Steine unterschiedlichen Formats, Gesteinssplitter, Tafla, Sand, Mörtel) im Innern der Stufen verlegt. Der Steintransport erfolgte über die von Steinreihe zu Steinreihe nach oben „mit wachsenden“ Rampen. Nach Fertigstellung jeder Schicht der Außenmauer der einzelnen Stufen des Kernmauerwerks und Einbringen des Füllmaterials mussten die Rampen erhöht, d.h. verlängert werden. Der schon errichtete Teil war davon nicht betroffen. Die Seilwinden mussten ebenfalls versetzt werden.

Die Transportrampen werden mit einer Steigung von 26,5° – das Verhältnis Basis zu Höhe beträgt dann 2:1 – und mit der Breite der jeweiligen Stufen des Kernmauerwerks (4,8 m auf den beiden ersten Stufen und 4,2 m auf allen weiteren Stufen) angenommen. Das Neigungsverhältnis 2:1 (26° 33' 54“) findet – wie bereits erwähnt – mit nur geringen Abweichungen bei der Neigung/Steigung der Korridorsysteme in fast allen Pyramiden der 4.Dynastie Anwendung. Die Rampen bestehen zum einen auf einer Breite von 3 m aus der eigentlichen Transportbahn und zum anderen aus einer Treppe, die daneben verläuft. Die Breite der Rampe entspricht insgesamt der Breite der jeweiligen Stufe. Die Anordnung einer Rampe mit drehbar angeordneter Walze zeigt Abb.13.

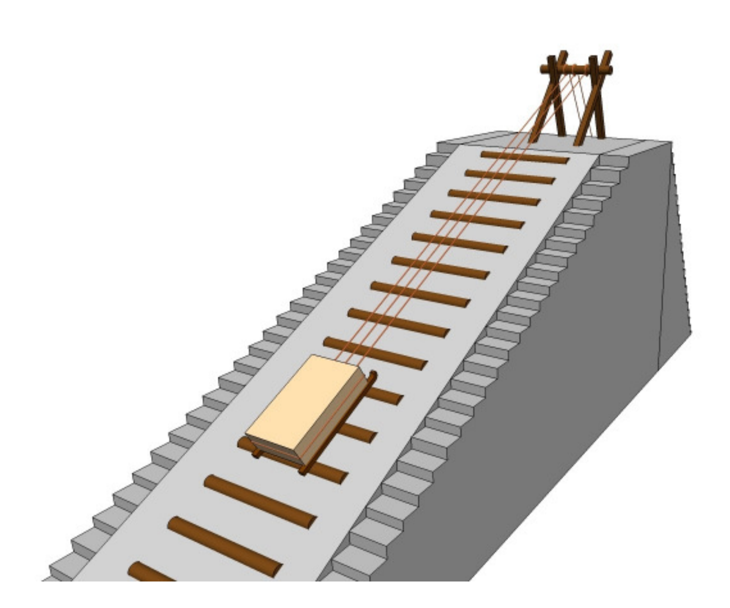


Abb. 13 Transport der Steine über eine drehbar angeordnete Walze als Umlenkrolle

Für die Ausgestaltung der Transportbahn der Rampe (Oberfläche) sind verschiedene Ausführungen vorstellbar:

- Die Oberfläche besteht aus geglättetem Kalkstein.
- In die Oberfläche sind Längsspuren eingearbeitet, die etwas breiter als die Schlittenkufen sind. Darin befinden sich in einem Mörtelbett beweglich angeordnete Steinkugeln aus Dolerit.
- Die Oberfläche besteht aus in einem Mörtelbett befestigten Steinkugeln aus Dolerit.
- In die Oberfläche sind Querrillen eingearbeitet, in die Holzbohlen eingelegt sind. Diese bewegen sich unter dem gezogenen Stein eine gewisse Strecke mit und rollen nach Entlastung wieder in ihre Ausgangsposition zurück.

Eine mögliche Anordnung der Rampen auf den einzelnen Stufen der Umbauung zeigt Abb.14. Die Rampen auf den Stufen 1–6 können auf allen vier Seiten des Bauwerks errichtet werden.

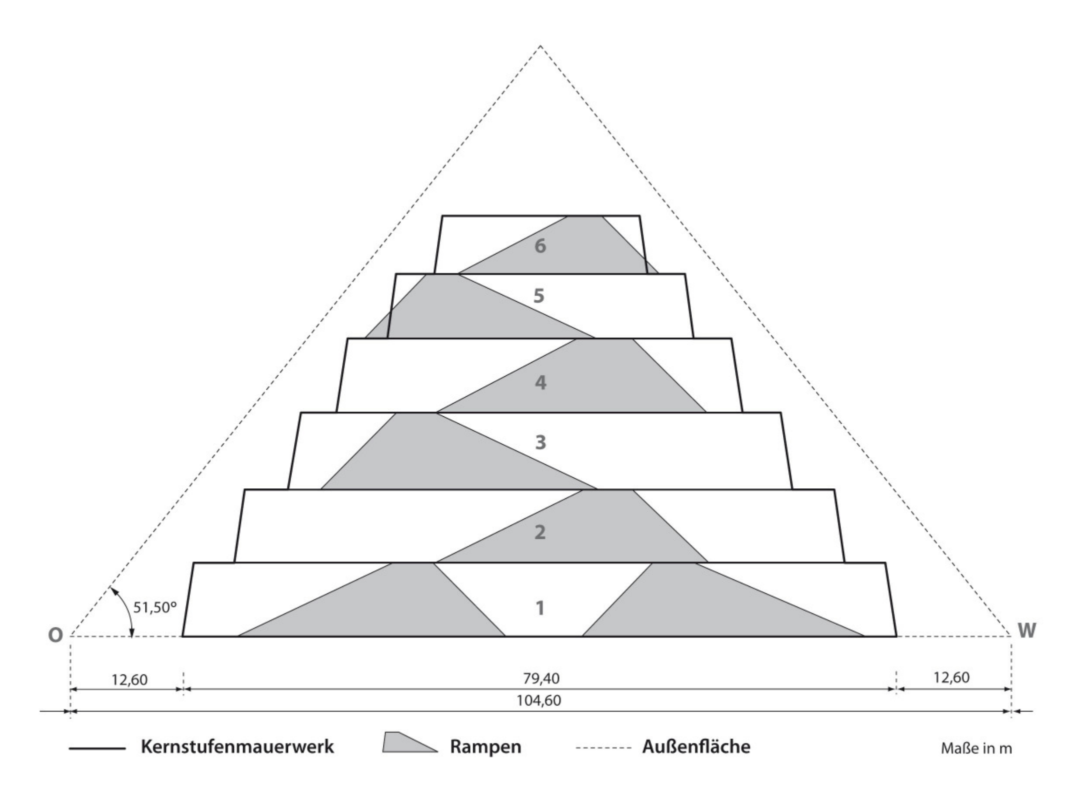


Abb. 14 Anordnung der Rampen für Umlenkwalzen auf den Stufen 1–6 des Kernmauerwerks

Unter Zugrundelegung der Abmessungen der Transportrampe (Abb.14) lassen sich auf jeder Pyramidenseite auf den einzelnen Stufen des Kernmauerwerks Rampen wie folgt genannt anordnen:

Stufe 1	2 Rampen
Stufe 2	1 Rampe
Stufe 3	1 Rampe
Stufe 4	1 Rampe
Stufe 5	1 Rampe
Stufe 6	1 Rampe

Aus dieser Darstellung wird noch einmal deutlich, dass die Stufen des Kernmauerwerks von jeder Seite der Pyramide aus zeitgleich über zwei Rampen bzw. über eine Rampe gebaut werden können. Die Transportkapazität wird somit gegenüber senkrecht zu den Außenseiten der Pyramide oder spiralförmig angeordneten Rampen wesentlich erhöht.

Die im Folgenden gemachten Ausführungen sollen beispielhaft das Transportprinzip auf einer steilen Rampe aufzeigen. Einzelne Parameter sind aufgrund allgemeiner Erfahrungen im Bauwesen angenommene Größen, die jedoch nicht durch praktische Versuche erhärtet wurden.

Auf der oberen Plattform (5 m Länge) der einzelnen Rampen ist jeweils eine Seilumlenkrolle an der der Rampe gegenüber liegenden Seite angeordnet. Eine mögliche Ausführung und Anordnung einer Seilumlenkrolle zeigt Abb.15.

Die Seilwinde besteht aus kreuzförmig zusammengebundenen und im Boden verankerten Hölzern, auf denen die Walze liegt. Nachdem die größten Steine Abmessungen von ca. 2,3 m auf 1,4 m bei einer Höhe von 0,6 m (Gewicht ca. 4,5 t) haben[53], können die Stützen für die Walze so weit auseinander angeordnet werden, dass der Schlitten mit der Steinlast bzw. die Steinblöcke unmittelbar auf die Plattform gezogen werden können.

---

[53] Dabei handelt es sich um die Steine der Außenmauer der einzelnen Stufen des Kernmauerwerks.

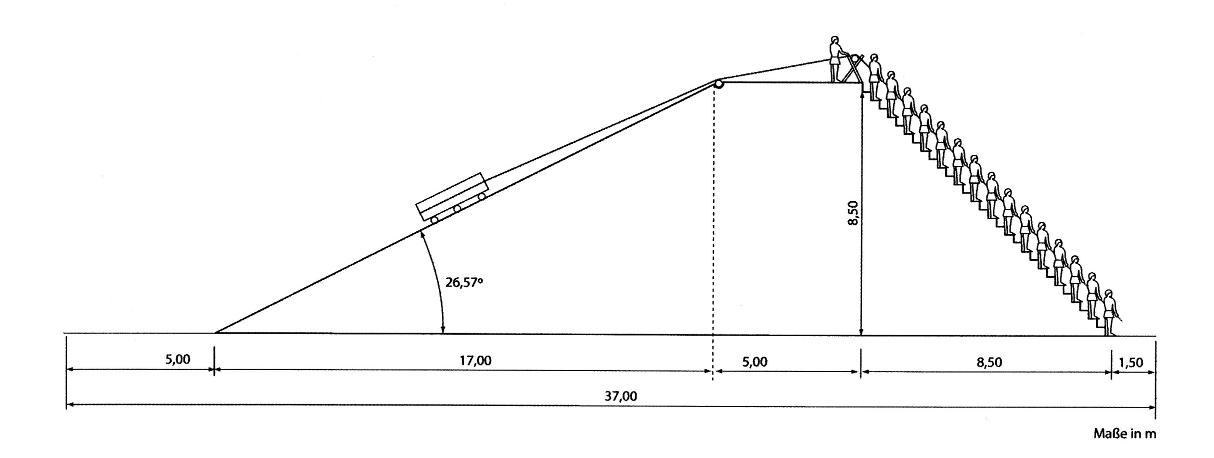


Abb. 15 Anordnung der Seilumlenkwalze am oberen Ende der Rampe

Die Abmessungen der Schleppunterlage aus Holz (z.B. Schlitten) werden mit einer Länge von 2,5 m und eine Breite von 1,5 m angenommen. Denkbar ist jedoch auch, dass die Steine direkt auf der Rampe an Seilen befestigt nach oben gezogen wurden. Dafür muss dann eine entsprechend große Zugkraft angesetzt werden. Der Vorteil besteht jedoch darin, dass Aufladen und Abladen der Steine sowie ein Rücktransport des Schlittens entfallen. Die Schleppunterlagen müssen so gestaltet sein, dass sie in beide Richtungen gezogen werden können (Richtungswechsel auf der oberen Plattform einer Rampe zum Fußpunkt der nächsten Rampe).

Dies ist die erforderliche Zugkraft für den Transport eines Steines unmittelbar über eine geglättete Kalksteinrampe mit der Neigung von 2:1 bzw. einem Winkel von 26,5° und einer Gleitreibungszahl von 0,25 und stellt somit den ***ungünstigsten Fall*** dar. Werden Schlitten bzw. Holzunterlagen mit geringerer Gleitreibungszahl, quer gelegte Holzbohlen[54], eine mit feinem Sand[55] bestreute glatte Oberfläche oder eine Unterlage mit Kugeln aus Dolerit benutzt, ergibt sich eine Zuglast von max. 2200 kp[56]. Diese verringert sich bei kleineren Steinblöcken noch weiter.

Die notwendige Reibungskraft, damit die Walze unter dem Seil nicht durchdreht, wird durch eine raue Holzoberfläche, die natürliche Rauheit der Seile, durch eine Mehrfachumschlingung und durch eine Zugkraft entlang der Rampe zu deren Fußpunkt erzielt. Das Seil wird zum Fußpunkt der Rampe zurückgeführt und von Arbeitern nach unten straff geführt bzw. gezogen. Dort befindet sich auch eine Sicherungseinrichtung (z.B. im Stein verankerte Holzpflöcke), welche ein eventuelles Zurückrutschen der Last (Speichenbruch o.Ä.) durch Arretieren des Seils verhindert.

Der waagerechte Weitertransport der Steine am jeweiligen Ende einer Rampe zu dem Ort der Verlegung in den einzelnen Schichten der Stufen des Kernmauerwerks bzw. des Verkleidungsmauerwerks sowie zur nächsthöher gelegenen Rampe konnte mittels Hebeln und über Steinkugeln vorgenommen werden. Wie bei der Pyramide G III c (Mykerinos) ersichtlich ist, wird auch beim Füllmauerwerk im Stufeninneren die jeweilige Schichthöhe eingehalten, sodass ein Verschieben der Steinblöcke über Steinkugeln gut möglich ist. Es wird weiterhin angenommen, dass die jeweils oberste waagerechte Schicht der Rampen auf den ersten Metern nach Ende der Schräge mit im Mörtel befestigten Steinkugeln aus Dolerit versehen ist, damit die Schlitten bzw. die Steinblöcke ggf. gedreht werden können, um anschließend ebenfalls auf Steinkugeln zum Weitertransport bereit zu stehen.

[54] Archäologisch erst ab dem MR belegt. Andererseits ist das Prinzip der Walze schon im AR bekannt.
[55] Feiner Sand hat eine mit Steinkugeln vergleichbare günstige Rollreibung zur Folge.
[56] Mit Blick auf die zwangsläufig groben Abschätzungen wurde auf eine Einbeziehung der zusätzlichen – relativ geringen – Reibungsverluste an der Auflage der Walze verzichtet.

Die einzelnen Abschnitte bei dem Bau des Kernmauerwerks mittels Tangentialrampen und Seilwinden zeigen die folgenden Abbildungen. Auf die Darstellung vergleichbarer Baustufen mit Rampen unter Verwendung von Umlenkrollen wird an dieser Stelle verzichtet.

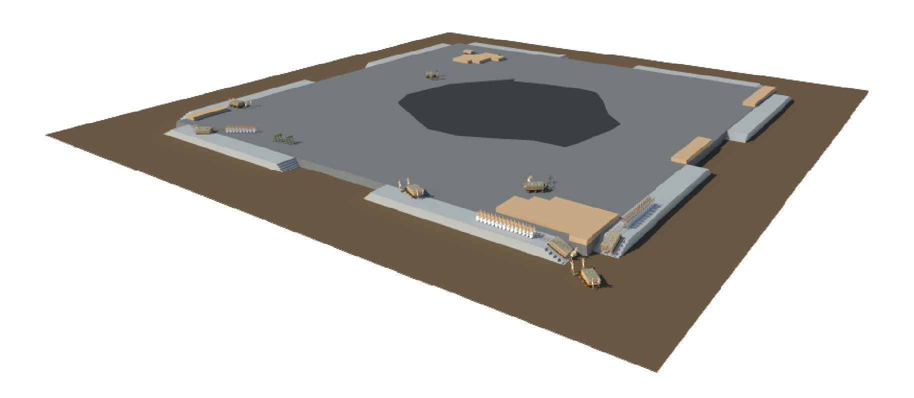


Abb. 16 Verlegen der zweiten Steinschicht für die 1. Stufe des Kernmauerwerks. Im Inneren steht ein Felssporn, der von der Stufe umschlossen wird

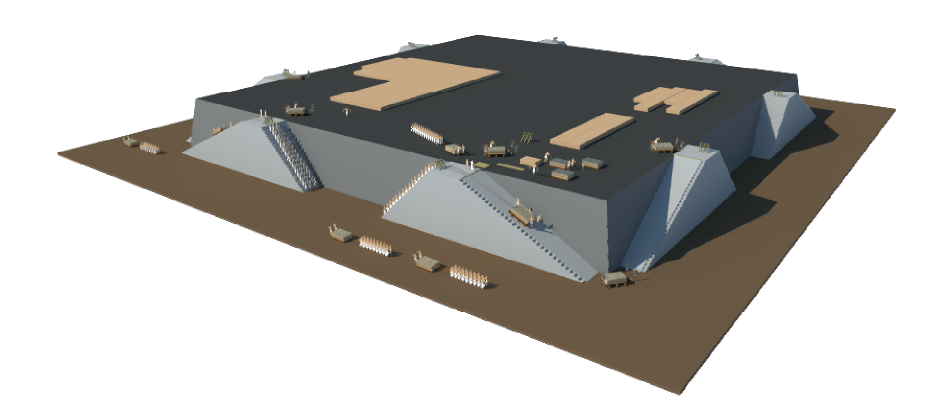


Abb. 17 Die erste Stufe des Kernmauerwerks ist fertiggestellt

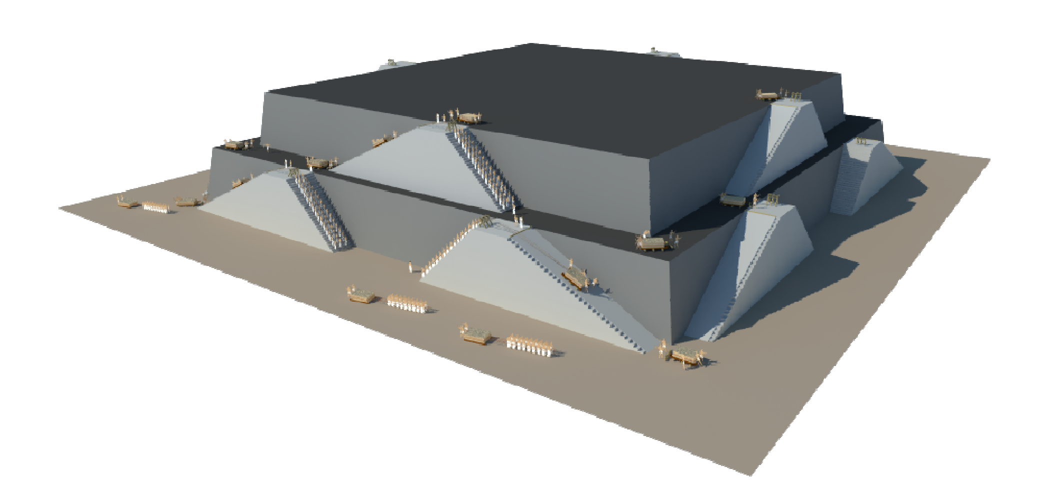


Abb. 18 Die zweite Stufe des Kernmauerwerks ist fertig gestellt

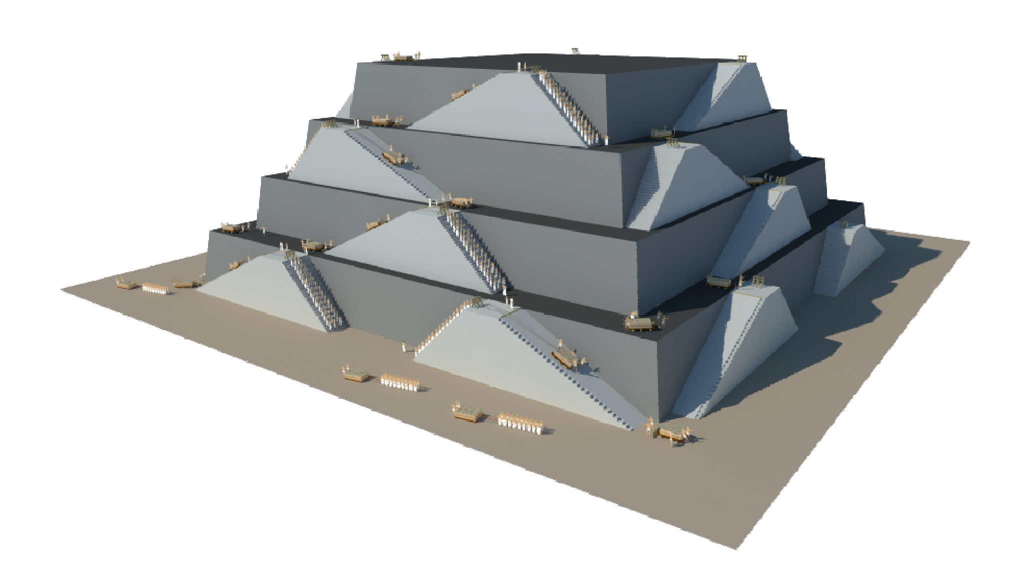


Abb. 19 Die vierte Stufe des Kernmauerwerks ist fertig gestellt

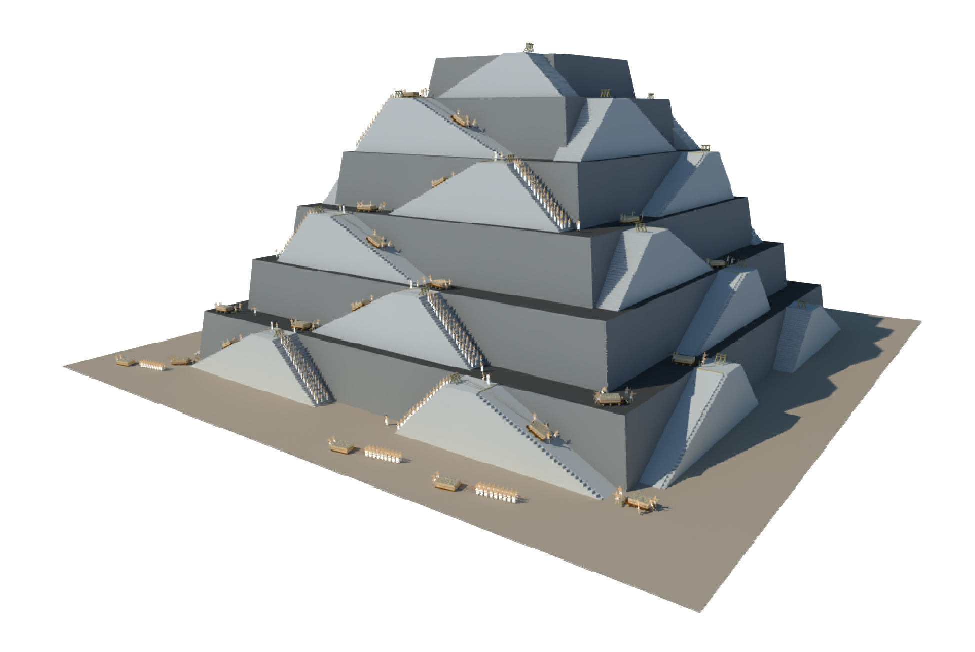


Abb. 20 Die sechs Stufen des Kernmauerwerks sind fertig gestellt

Nach Fertigstellung der sechsten Stufe des Kernmauerwerks werden die Rampen wieder zurückgebaut (Abb. 21)

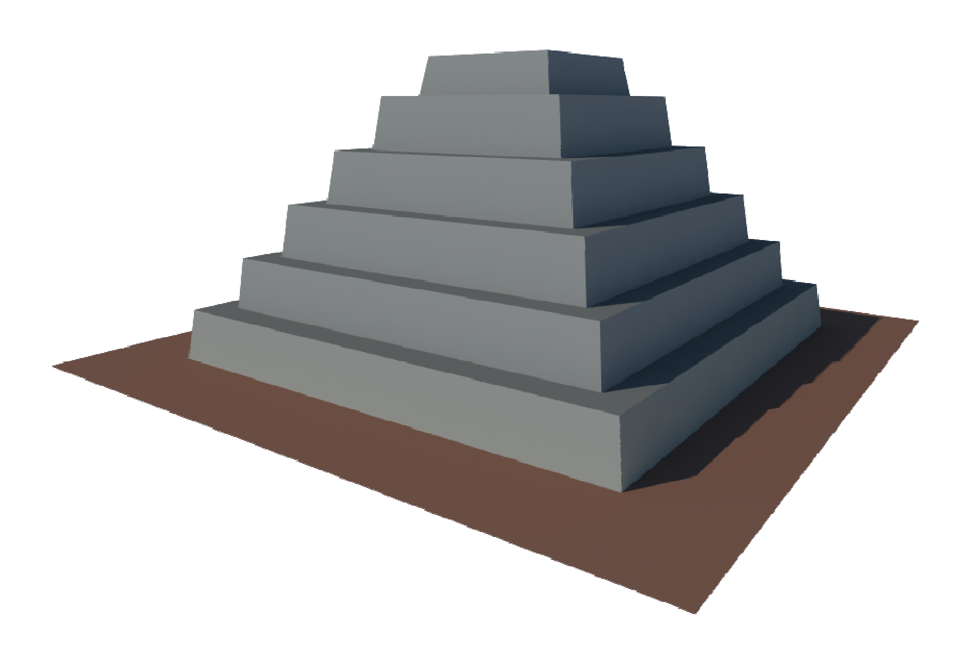


Abb. 21 Fertig gestelltes Kernmauerwerk nach Rückbau der Rampen

Anbringen des Verkleidungsmauerwerks

Die bei vielen Pyramiden heute noch feststellbare sehr genau durchgeführte Vermessung und Bauausführung der Basisschicht der Außenverkleidung sowie deren Abmessungen zeigen, dass der Bau des Verkleidungsmauerwerks[57] und auch der Außenverkleidung[58] grundsätzlich von der Basis aus zur Pyramidenspitze hin erfolgte[59].

Bei einigen Pyramiden, z.B. den Königinnenpyramiden des Mykerinos G III b und G III c wurde nur das Kernmauerwerk errichtet[60]. Es sei daher an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass diese Tatsache die getrennten Bauvorgänge von Kernmauerwerk und Verkleidungsmauerwerk mit äußerer Verkleidung belegt.

Ein genaues Verlegen und Bearbeiten der Steine des Verkleidungsmauerwerks und der Außenverkleidung erfordert eine außerhalb der Außenfläche der Pyramide angeordnete Arbeitsplattform. Nur auf diese Weise ist auch ein gefahrloses Arbeiten möglich. Die Anordnung der Rampen zum Bau der Arbeitsplattformen entspricht derjenigen beim Bau des Kernmauerwerks. Auf eine Darstellung im Einzelnen wurde daher verzichtet.

Wie in der Bresche auf der Nordseite ersichtlich ist, wurden die Steine des Verkleidungsmauerwerks auf den Stufen des Kernmauerwerks aufgeschichtet und an die rückwärtigen Versetzungen der Außenmauer des Kernmauerwerks angepasst. Man kann fast von einer Verzahnung sprechen. Ohne den Bau einer äußeren Arbeitsplattform mit Rampenzuführungen ist dies technisch nicht möglich. Gleiches gilt für die Verlegung und Bearbeitung der Steine der Außenverkleidung. Nur mit einer von außen angeordneten Arbeitsplattform ist es möglich, die Steine der Außenverkleidung vor Ort passgenau zu bearbeiten sowie später beim Rückbau der Arbeitsplattform die Außenfläche der Pyramide von oben nach unten zu glätten. Die Unebenheiten der in Bosse stehenden Außenverkleidung geben der an die Außenfläche der Pyramide angelehnten Baurampe entsprechenden Halt.

Für den Steintransport auf den einzelnen Stufen der Bauplattform wird der Bau etwa fünf Meter breiter Rampen, die den entlang der Stufen des Kernmauerwerks gebauten Rampen vergleichbar sind, aus Nilschlammziegeln oder kleineren Steinen mit einer Außenmauer aus Stein an den Seitenflächen der angenommen. Diese Ziegelrampen mit einer Neigung von 2:1 wachsen von Steinlage zu Steinlage mit. Innerhalb einer Steinlage werden zuerst die Steinblöcke des Verkleidungsmauerwerks eingebracht und dann die der Außenverkleidung auf der darunter liegende Lagen eingebaut bzw. nach Herstellen einer gemeinsamen Fuge seitlich zum Nachbarstein verschoben. Der Bau der Pyramidenspitze sowie das Aufsetzen des Pyramidion sind über die Stufen der Umbauung mit der Arbeitsplattform ohne weiteres möglich.

Die Steine der Außenverkleidung sind bereits vor dem Transport in ihren horizontalen Auflageflächen exakt bearbeitet; die Vorderseiten stehen in Bosse. Die Seitenflächen der Steine der Außenverkleidung einer Steinlage sind zumindest teilweise erst beim Verlegen genau zugeschnitten worden. Wie an verschiedenen Stellen zu beobachten ist, sind manche dieser Schnitte nicht genau senkrecht ausgeführt und können daher nur vor Ort durchgeführt worden sein. Diese Arbeiten erfordern ebenfalls eine Arbeitsplattform außerhalb der Außenfläche der Pyramide, um den Sägevorgang von beiden Seiten aus gefahrlos durchführen zu können. Nur ein maßgenaues Aneinanderpassen der Steine der äußeren Verkleidungsschicht verhindert das Eindringen von Wasser und bietet Flugsand bei Stürmen keinen Ansatzpunkt für Beschädigungen des Mauerwerks. Vor dem Anfügen des nächsten

---

[57] Unter dem Begriff „Verkleidungsmauerwerk“ werden die waagerecht verlegten Steinschichten zwischen den Stufen des Kernmauerwerks und der Außenverkleidung aus Tura-Kalkstein bzw. Assuan-Granit verstanden (Backing Stones).

[58] Die Steine der Außenverkleidung aus Tura-Kalkstein bzw. Assuan-Granit werden an der Außenfläche der Pyramide beim Einbau als Bossen stehen gelassen.

[59] Stadelmann weist darauf hin, dass aufgrund seiner Beobachtungen an der Knickpyramide die äußere Verkleidungsschicht/Außenverkleidung von Anfang an zusammen mit dem Kernmauerwerk – also von unten nach oben – verlegt worden ist (R. Stadelmann, Die ägyptischen Pyramiden (Mainz 1997).

[60] P. Jánosi, Die Pyramidenanlagen der Königinnen (Wien 1996) S. 85.

Verkleidungssteines wurde am vorhergehenden Stein die Neigungslinie der Seitenfläche der Pyramide angezeichnet, damit beim späteren Abarbeiten der von dieser Markierung nach außen in Bosse stehenden Steine der Außenverkleidung der genaue Neigungswinkel eingehalten werden konnte. Die Glättung der Außenflächen der in Bossen stehenden Außenflächen der Außenverkleidung erfolgte ebenfalls von der Bauplattform aus nach Fertigstellung der Pyramidenspitze von oben nach unten als abschließende Baumaßnahme zeitgleich mit dem Rückbau der Ziegelrampen[61].

Die Phasen der Errichtung und des späteren Rückbaus der Arbeitsplattformen und der dazugehörenden Rampen sind für den Einsatz von Seilumlenkrollen in den Abb. 22 - 24 dargestellt:

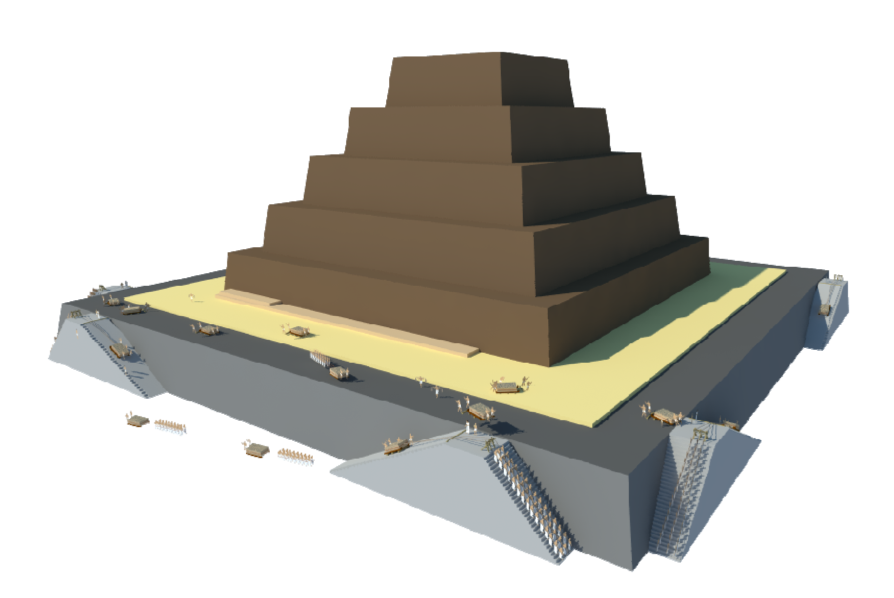


Abb. 22 Fertig gestellte Arbeitsplattform 1 mit Rampen

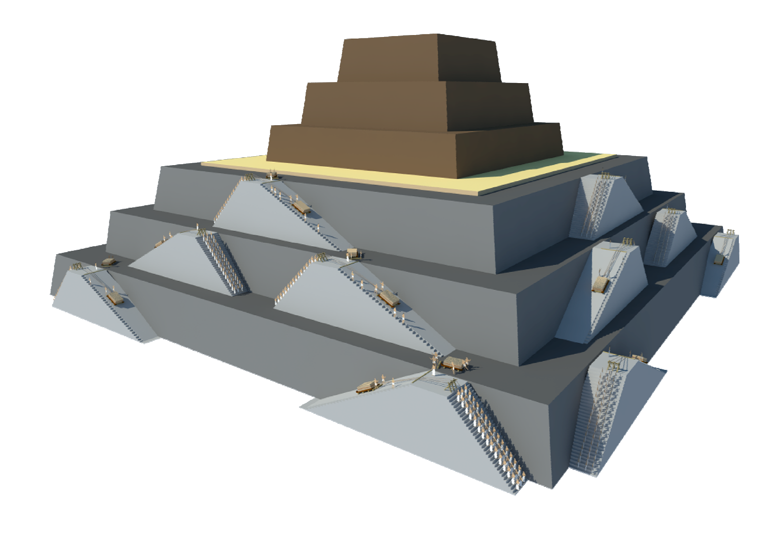


Abb. 23 Fertig gestellte Arbeitsplattform 3 mit Rampen

[61] Herodot berichtet von der Fertigstellung der Pyramide von oben nach unten (A. Horneffer, Herodot Historien. Deutsche Gesamtausgabe (Stuttgart 1961), Historien II 125); Diodor berichtet von einer Bauweise der Pyramiden, wonach Erdaufschüttungen (Nilschlammziegel) entlang der Außenseiten vorgenommen wurden (F.W. v.Bissing, Der Bericht des Diodor über die Pyramiden (Berlin 1901)). Plinius erwähnt in diesem Zusammenhang ein Terrassensystem (G. Goyon, Die Cheopspyramide (Augsburg 1990) 117).

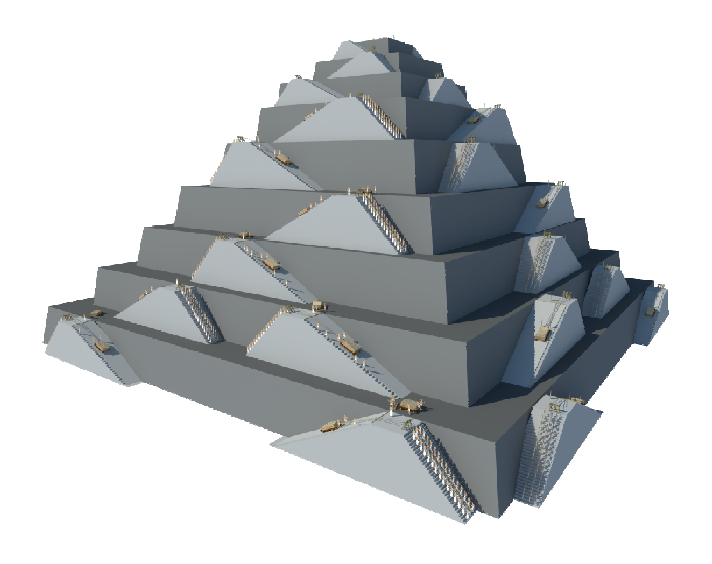


Abb. 24Aufsetzen des Pyramidion nach Fertigstellung der obersten Arbeitsplattform

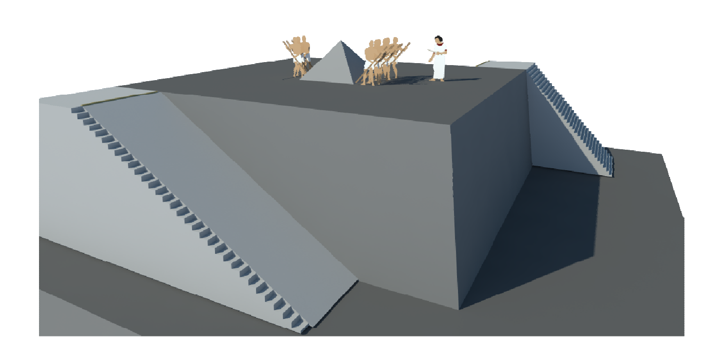


Abb.25 Positionieren des Pyramidion

Nach Montage des Pyramidion erfolgt die Glättung der in Bossen stehenden Außenflächen der Außenverkleidung ebenfalls von der Bauplattform aus von oben nach unten als abschließende Baumaßnahme zeitgleich mit dem Rückbau der Bauplattform selbst (Abb. 26)

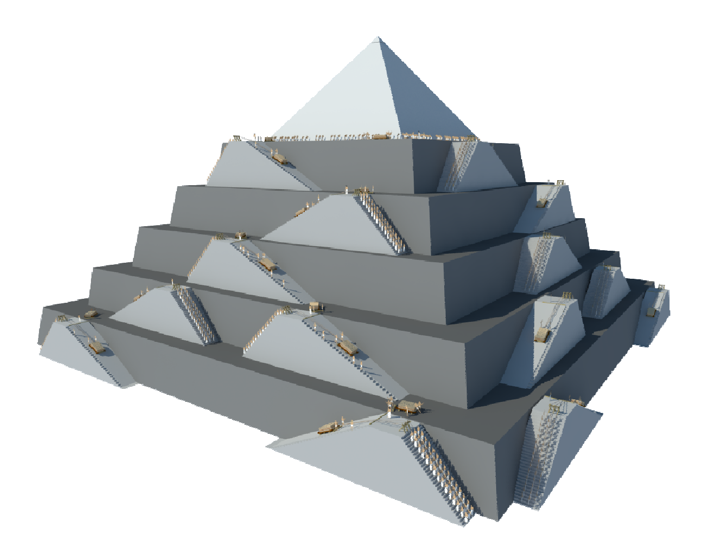


Abb. 26 Rückbau der Arbeitsplattform, der äußeren Rampen und Glätten der Bossen

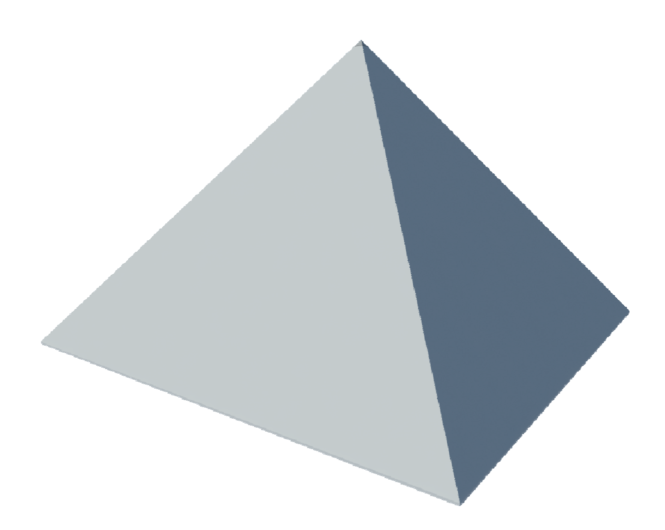


Abb. 27 Fertig geglättete Pyramide

Berechnung der Bauzeit der Pyramide des Mykerinos

Bei der Berechnung der bei der Pyramide des Mykerinos zu erbringenden Bauleistungen und der sich daraus ergebenden Bauzeit muss zwangsläufig von gewissen Durchschnittswerten ausgegangen werden, da die Steingrößen in den einzelnen Lagen unterschiedlich sind. Nachdem die Grabkammern der Pyramide des Mykerinos unterhalb der Stufen des Kernmauerwerks angeordnet sind, können diese Durchschnittswerte einfach berechnet werden:

– Die Blockgröße der Steine des Kernmauer- und Verkleidungsmauerwerks wird mit einer durchschnittlichen Abmessung von 1,3 m x 1,3 m und einer Höhe von 0,7 m (1,2 m³) angenommen. Das Gewicht beträgt dann ca. 3 t[62]. Dabei ist berücksichtigt, dass die Füllsteine des Kernmauerwerks geringere und die Außenmauern des Kernmauerwerks größere Abmessungen haben. Die hier angenommenen Größen dienen der Vereinfachung der Modellrechnung. Diese durchschnittliche Blockgröße wird im Folgenden für eine Schlittenladung bzw. einen Schleppvorgang angesetzt.
– Für die Steine der Außenverkleidung werden durchschnittliche Abmessungen von 0,7 m x 0.7 m x 1,1 m (ca. 0.54 m³) mit einem Gewicht von 1,5 t angenommen. Jeweils zwei dieser Steinblöcke ergeben eine Schlittenladung bzw. einen Schleppvorgang.
– Die Transportleistungen beziehen sich auf die Bauleistungen für die außen angeordnete Bauplattform und das Kernmauerwerk sowie die äußere Verkleidung. Das Versetzen der Seilwinden erfolgt – bezogen auf die Zahl der Arbeitstakte (siehe weiter unten) – nur gelegentlich, sodass die dafür notwendige Umrüstzeit bei der Abschätzung der Bauzeiten nicht berücksichtigt wird.
– Ein Abschlag vom Steinvolumen für die mit Mörtel, Sand etc. gefüllten Zwischenräume wird nicht vorgenommen.

Beim Bau der Pyramide fallen unterschiedliche Transport- und Bauarbeiten an. Neben dem Transport der Steine nach oben müssen diese dann auch waagerecht zu dem jeweiligen Einbauplatz gebracht werden. Der Transport der Steine nach oben erfordert wegen der relativ begrenzten Zahl der Rampen wesentlich mehr Zeit als das waagerechte Verbringen der Steine in der jeweiligen Ebene zum Einbauplatz, da der horizontal durchzuführende Transport sowie das anschließende Verbauen in der jeweiligen Schicht von einer größeren Anzahl Arbeiter zeitgleich erfolgen kann und somit im Vergleich

[62] Das spezifische Gewicht von Kalkstein wird nach D. Arnold, Lexikon der ägyptischen Baukunst (Düsseldorf 1997) 119 mit 2,4 t/m³ angenommen.

zum Transport über die Rampen als zeit*un*kritisch anzusehen ist. Es wird daher in folgende Berechnung nur der Steintransport auf den Rampen einbezogen.

Für den Transport einer Schlittenladung bzw. für einen Schleppvorgang bis zur Höhe einer Stufe werden folgende praxisnahe Annahmen getroffen: Für die Dauer des Transports auf eine nächst höher gelegene Stufe wird eine Zeit von 5 min angesetzt. Dies bedeutet eine Schleppgeschwindigkeit von ca. 4 m pro min. Für das Befestigen und Lösen der Seile vom Schlitten bzw. Steinblock, das Umsetzen des Schlittens bzw. der Last und den Rücktransport eines entladenen Schlittens, des Seiles etc. wird ebenfalls eine Zeit von 5 min veranschlagt, sodass sich eine Taktzeit mit 10 min ergibt.

Bei der Berechnung der Bauzeit der Pyramide ist zu berücksichtigen, dass z.B. die Steine für die oberen Stufen jeweils über mehrere Rampen mit einem entsprechend größeren Zeitaufwand transportiert werden müssen. Geht man allerdings von einem kontinuierlichen Transport über alle vorhergehenden Rampen bis zur Ebene der Verbauung aus, wird dort im Takt von je 10 min ein Schlitten bzw. Schleppvorgang eintreffen. Der Mehraufwand, d.h. die größere Transporthöhe, findet jedoch in einer größeren Zahl eingesetzter Arbeitskräfte seinen Niederschlag. Die angenommenen durchschnittlichen Werte für die Steingrößen und die Taktzeiten gehen unmittelbar in die Berechnung der Bauzeit ein. Werden diese Größen verändert, ergibt sich zwangsläufig eine andere Bauzeit, bei deren Ermittlung es sich daher aufgrund der getroffenen Annahmen nur um eine Abschätzung handeln kann.

Die Berechnung der 6 Stufen des Kernmauerwerks der Pyramide des Mykerinos ergibt ein Volumen von 140 736 m³, welches 117 280 Steinblöcken mit einem Volumen von je 1,2 m³ und somit der gleichen Zahl von Schlittenladungen entspricht. Unter Einbeziehung der Zahl der Rampen ergibt sich die Gesamtzahl der Arbeitstakte bei Verwendung der Seilumlenkrolle mit 24 093. Die Pyramidenspitze mit einem Volumen von 900 m³ wird später im Zusammenhang mit der Errichtung der Arbeitsplattform gebaut. Für die Ermittlung der Bauzeit des Kernmauerwerks wird weiterhin angenommen, dass an 300 Tagen im Jahr und an 10 Stunden jedes dieser Tage (Schichtbetrieb) gearbeitet wurde, sodass pro Jahr bei der angenommenen Dauer von 10 min für einen Schleppvorgang insgesamt 18000 Arbeitstakte stattfanden. Für den Bau des Kernmauerwerks der Pyramide des Mykerinos wurden demnach etwa 1,3 Jahre benötigt. Hinzu kommen der Bau und Abbau der Rampen der Stufen 1–6 (insgesamt 28 Rampen) mit einem Volumen von ca. 15 400 m³. Daraus errechnet sich bei einem gleichzeitigen Bau und Rückbau auf den vier Seiten eine Zeit von ca. 0,3 Jahren. Der ***Bau des Kernmauerwerks*** konnte somit in etwa ***1,6 Jahren*** erfolgen.

Die Berechnung des Transportvolumens und somit die Bauzeiten für die außen angebrachte ***Arbeitsplattform*** sowie der Pyramidenspitze , des Verkleidungsmauerwerks und der Außenverkleidung ergibt ein Volumen von 141 358 m³ bzw. 22 458 Arbeitstakte. Für die Bauzeit ergebenen sich damit – bei wiederum 300 Arbeitstagen pro Jahr - ca. ***1,5 Jahre***. Anschließend müssen die Baurampen und die Arbeitsplattform wieder demontiert und die in Bosse stehenden Steine der äußeren Verkleidungsschicht geglättet werden. Die für den ***Rückbau*** der Arbeitsplattform notwendige Zeit beträgt bei ansonsten gleichen Annahmen ***0,6 Jahre***.

Der notwendige Zeitaufwand für die ***Glättung*** kann nur grob geschätzt werden. Es wird dafür ein Zeitraum von ***ca. 0,2 Jahren*** angenommen, dem folgende Überlegungen unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Glättungsarbeiten nicht vollständig durchgeführt wurden, zugrunde liegen. Es wird davon ausgegangen, dass pro Arbeitstag von einem Arbeiterteam eine Fläche der in Bosse stehenden Steine der Außenverkleidung (Tura Kalkstein ab der 17. Steinlage) von 0,5 m mal 0,5 m geglättet werden kann. Für die Granitverkleidung wird dieser Wert um den Faktor 10 auf 0,30 mal 0,30 m reduziert. Durch Einsatz vieler Arbeitskräfte kann diese Arbeitsleistung auch im unteren Teil der Pyramide und zeitgleich auf allen vier Seiten der Pyramide erbracht werden. Bei der Höhe der Pyramide von 65 m ergeben sich insgesamt ca. 434 Tage bzw. 1,5 Jahre. Der Zeitbedarf für die Glättungsarbeiten liegt über der für den Rückbau der Bauplattform benötigten Zeitspanne von 0.6 Jahren. Berücksichtigt werden muss jedoch noch die Tatsache, dass der Rückbau der Arbeitsplattform und der Rampen koordiniert mit den Glättungsarbeiten durchgeführt werden muss und es immer wieder

zu Unterbrechungen der Rückbauarbeiten wegen gegenseitiger Behinderung der verschiedenen Arbeiten kommt. Dafür werden weitere 0,2 Jahre angenommen.

Das nach Fertigstellung der Pyramide zu entsorgende Baumaterial der Rampen entlang der Arbeitsplattform, welches zum Teil aus Nilschlammziegeln bestand, hat mit ca. 60 000 m³ etwa ¼ des Volumens der Pyramide. Das Ziegelmaterial konnte in der Landwirtschaft wieder verwendet werden; der übrige Bauschutt wurde an den nordöstlichen Abhängen des Wüstenplateaus bzw. im südlichen Umfeld der Pyramiden auf dem Gisa-Plateau gelagert.

Für die ***Bauzeit der Pyramide des Mykerinos*** (ohne vorbereitende Arbeiten) ergibt sich somit ein Zeitraum von ***ca. 4,8 Jahren***. Insgesamt wurden beim Bau der Pyramide des Mykerinos durchschnittlich ca. 202 m³ bzw. 186 Steinblöcke pro Tag transportiert.

Eine vergleichende Betrachtung mit den Bauzeiten der Roten Pyramide und der Cheopspyramide

Die anhand des Baus der Pyramide des Mykerinos durchgeführte Berechnung der Bauzeit wird an zwei weiteren Pyramiden, deren Bauzeit weitgehend bekannt ist, „gespiegelt“. Dabei handelt es sich um überschlägige Vergleichsrechnungen, mit denen eine ungefähre Bauzeit ermittelt wird. Die angenommene Anordnung der Stufen des Kernmauerwerks und der Rampen sowie die Taktzeiten sind dafür ein Vorschlag. Der Bau des Verkleidungsmauerwerks, der Außenverkleidung und der Arbeitsplattform wird nach dem gleichen Prinzip wie bei der Pyramide des Mykerinos vorgenommen.

Berechnung der Bauzeit der Roten Pyramide

Für eine überschlägige Abschätzung der reinen Bauzeit der Roten Pyramide nach der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Hypothese müssen ebenfalls Annahmen über die –archäologisch zum Teil nicht belegbaren – Abmessungen und die Zahl der Stufen des Kernmauerwerks sowie weitere Festlegungen getroffen werden:

- Die Stufenhöhe wird mit 10 m angenommen. Daraus ergibt sich dann eine Zahl von 10 Stufen.
- Die durchschnittliche Größe der Steinblöcke des Verkleidungs- und Kernmauerwerks wird mit etwa 0,7 m Höhe, 1,1 m Breite und 1,0 m Tiefe angenommen[63]. Dies entspricht einem Volumen von 0,77 m³ mit einem Gewicht von 1,9 t.
- Die Taktzeit wird trotz der etwas längeren Rampen mit Blick auf das geringere Durchschnittsgewicht als bei der Pyramide des Mykerinos dennoch ebenfalls mit 10 min angenommen.
- Die Zahl der Arbeitstage/Jahr und der Arbeitsstunden/Tag werden analog zu den Werten bei den Berechnungen der Pyramide des Mykerinos angesetzt.
- Der Bau der beiden weitgehend unterirdisch gelegenen Grabkammern wird nicht gesondert betrachtet.

Für die überschlägige Ermittlung der Bauzeit der Roten Pyramide (ohne Vorbereitungsarbeiten) wird wiederum angenommen, dass an 300 Tagen im Jahr und an 10 Stunden jedes dieser Tage (Schichtbetrieb) gearbeitet wurde, sodass pro Jahr bei der angenommenen Dauer von 10 min für einen Schleppvorgang insgesamt 12000 Arbeitstakte durchgeführt werden konnten. Für den ***Bau des Kernmauerwerks*** der Roten Pyramide wurden unter diesen Annahmen ***11,6 Jahre*** berechnet. Die

[63] J.E. Perring, *The Great Pyramid.* (London 1839) hat die Höhe der unteren 21 Steinstufen des Verkleidungsmauerwerks mit insgesamt 21,4 m – also mit einer durchschnittlichen Stufenhöhe von 1,02 m – und die Breite mit 0,9 m angegeben; V. Maragioglio und C.A. Rinaldi, *L'Archittetura delle Piramidi Menfite*, Band III (Turin 1964), geben die Steinhöhen am Eingang mit durchschnittlich 50–70 cm und deren Tiefe mit 0,90–1,2 m an. R. Stadelmann, Die Pyramiden des Snofru in Dahschur, Erster Bericht über die Ausgrabungen an der nördlichen Steinpyramide, MDAIK 1982, 380–381, nennt für die Ecksteine des Verkleidungsmauerwerks bis zu einer Höhe von ⅔ der Pyramide Abmessungen von 1–1,3 m Höhe; R. Lepsius, LD I, Textband (Berlin 1897) 206, beschreibt die Blöcke des Kernmauerwerks als im Ganzem „…vielleicht nicht so groß wie in Gisa…“ .

Bauzeit für die Arbeitsplattform, das Verkleidungsmauerwerk und die Außenverkleidung beträgt unter Berücksichtigung der gemachten Annahmen ca. ***4,9 Jahre***. Anschließend müssen die Baurampen und die Arbeitsplattform wieder demontiert und die in Bosse stehenden Steine der Außenverkleidung geglättet werden. Die dafür notwendige Zeit beträgt ***3 Jahre***. Der für die Glättung errechnete Zeitaufwand umfaßt 0,8 Jahre zuzüglich eines Zuschlags von 0,5 Jahren für Koordinierungsarbeiten zwischen Rückbau der Arbeitsplattform und der Glättungsarbeiten. Für die reine ***Bauzeit der Roten Pyramide*** ergeben sich somit ***18,7 Jahre***. Insgesamt wurden beim Bau der Roten Pyramide durchschnittlich ca. 443 m³ bzw. 576 Steinblöcke pro Tag transportiert.

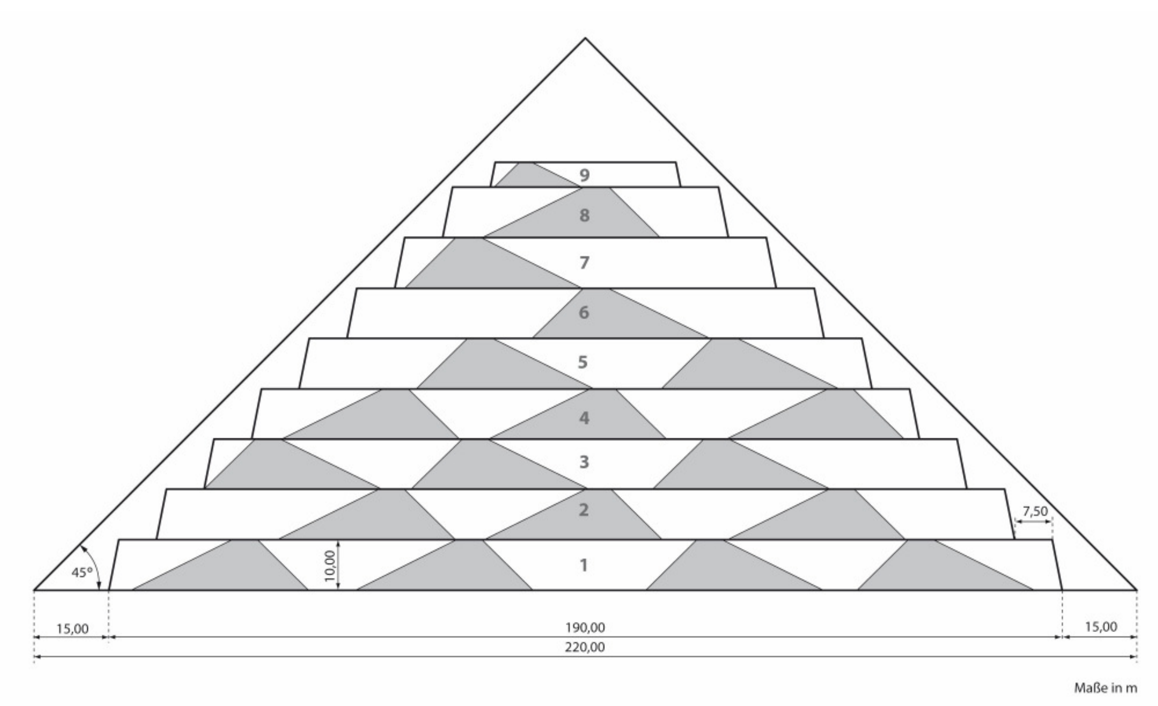


Abb.28 Vorschlag für ein Rampensystem beim Bau der Roten Pyramide

Berechnung der Bauzeit der Cheopspyramide

Für eine Abschätzung der reinen Bauzeit der Cheopspyramide müssen ebenfalls Annahmen über die – archäologisch zum Teil nicht nachweisbaren – Abmessungen und die Zahl der Stufen des Kernmauerwerks sowie weitere Festlegungen getroffen werden:

- Ausgangspunkt sind eigene Beobachtungen und Untersuchungen: Im so genannten „Grabräubergang“ ändert sich in der 7. Steinschicht (Unterkante 7,06 m über der Fundamentschicht) die Struktur des Kernmauerwerks in einer Entfernung von ca. 15 m vom Eingang. Unter Berücksichtigung der horizontalen Abmessungen der Außenmauer der ersten Kernstufe (1 m) und der nicht mehr vorhandenen Außenverkleidung (ca. 3 m) sowie der Neigung der Außenmauer der Kernstufen (80°) ergibt sich eine Basislänge der ersten Stufe des Kernmauerwerks von ca. 197 m (375 Ellen)[64].
- Weiterhin werden eine Stufenhöhe von 11 m und die Zahl der Stufen mit 12 zugrunde gelegt[65].
- Die Breite der Stufen ergibt sich dann unter Berücksichtigung der Fluchtlinie von 54°30´ entlang der Seitenkanten der Stufen des Kernmauerwerks zu 5,75 m.
- Die Taktzeit wird wegen der längeren Rampen gegenüber der Pyramide des Mykerinos mit 12 min angenommen.

---

[64] Dabei handelt es sich um eine rechnerisch ermittelte Annahme, welche die Stellen des Felskerns, die bis zum Verkleidungsmauerwerk reichen, außer Betracht lässt. Gleiches gilt für die vorgeschlagene Rampenanordnung entlang der 1.Stufe des Kernmauerwerks.

[65] Graefe nimmt bei 11 Stufen für die Höhe der Kernstufen 13 m und für die Stufenbreite 7,35 m an. Die Fluchtlinie der Stufenkanten in der Seitenfläche liegt damit ebenfalls bei 54,5.

- Das Volumen des Felskerns in der Basis der Pyramide wurde von Haase mit etwa 7,9 %[66] bzw. neuerdings mit 7,7 %, also ca. 200000 m³[67], der gesamten Baumasse berechnet. Goyon nennt ein Volumen zwischen 127000 und 160000 m³[68]. Das Volumen des Felskerns nach Haase wird in die Berechnungen miteinbezogen.
- Die weiteren Baudaten wie Zahl der Arbeitstage/Jahr und Steingrößen, durchschnittliches Gewicht der Steinblöcke etc. werden analog zu den Berechnungen der Pyramide des Mykerinos angesetzt[69].

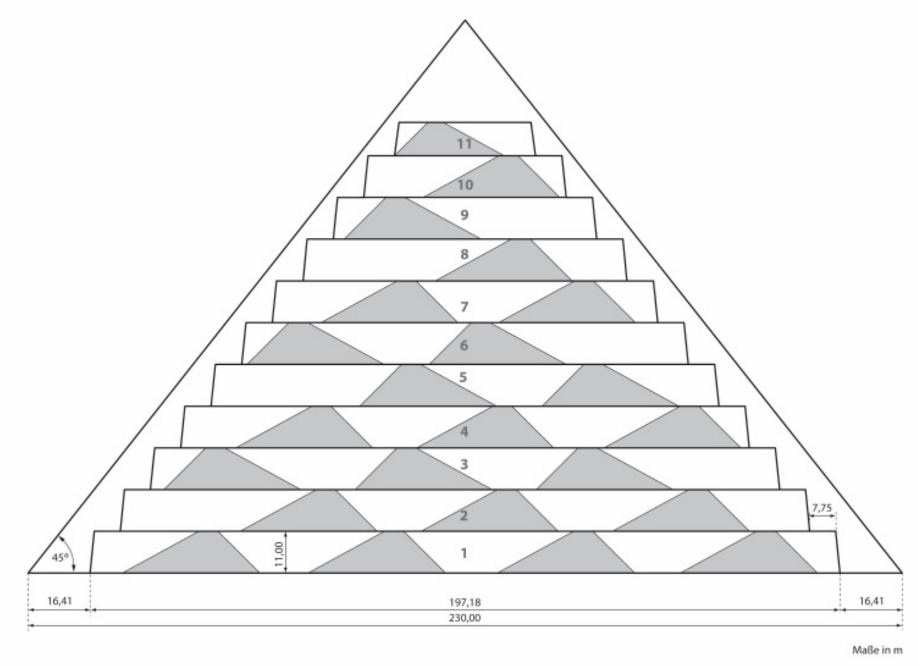


Abb.29 Vorschlag für ein Rampensystem beim Bau der Cheopspyramide

Für die überschlägige Ermittlung der Bauzeit der Cheopspyramide (ohne Vorbereitungsarbeiten) wird ebenso wiederum angenommen, dass an 300 Tagen im Jahr und an 10 Stunden jedes dieser Tage (Schichtbetrieb) gearbeitet wurde, sodass pro Jahr bei der angenommenen Dauer von 20 min für einen Schleppvorgang insgesamt 9000 Arbeitstakte durchgeführt werden konnten. Für den Steintransport beim ***Bau des Kernmauerwerks*** der Cheopspyramide wurden demnach 13,4 Jahre benötigt. Dieser Wert verringert sich um ¾ Jahr auf insgesamt ***12,8 Jahre*** unter Berücksichtigung des Volumens des Felssporns. Die Bauzeit für die Arbeitsplattform, das Verkleidungsmauerwerk und die Außenverkleidung beträgt somit unter Berücksichtigung der gemachten Annahmen ***6,9 Jahre***. Anschließend müssen die Baurampen und die Arbeitsplattform wieder demontiert und die in Bosse stehenden Steine der Außenverkleidung geglättet werden. Die dafür notwendige Zeit rechnet sich mit ***2,8 Jahren***. Der für die Glättung errechnete Zeitaufwand beträgt 1 Jahr zuzüglich eines „Koordinierungszuschlags“ von einem weiteren Jahr. Für die reine ***Bauzeit der Cheopspyramide*** ergeben sich somit ***22,5 Jahre***. Insgesamt wurden beim Bau der Cheopspyramide durchschnittlich ca. 393 m³ bzw. 327 Steinblöcke pro Tag transportiert.

Diese Betrachtung mit den erläuterten Durchschnittswerten für Steinformate und -gewichte müsste bei einer genaueren Betrachtung für den Transport der großen Kalksteinblöcke über dem Eingang auf der Nordseite der Pyramide sowie der Granitblöcke unterschiedlicher Formate (Große Galerie, Grabkammern, Entlastungskammern, Fallsteinsysteme etc.) modifiziert werden. Dabei wäre es

[66] M. Haase, Der Felskern der Cheopspyramide, Zeitschrift für Archäologie und archäologische Grenzwissenschaften, 1/1993 5–13.
[67] M. Haase, Eine Stätte für die Ewigkeit. Der Pyramidenkomplex des Cheops (Mainz 2004) 17.
[68] G. Goyon, Die Cheopspyramide (Augsburg 1990) 117.
[69] In verschiedenen Veröffentlichungen wird immer von einem Durchschnittsvolumen von 1 m³ für einen Steinblock und von einem theoretischen Volumen der Pyramide von 2,3 Mio. m³ – ohne Berücksichtigung des Felskerns, der Hohlräume sowie des Mörtel- und Schuttanteils – ausgegangen.

denkbar, dass im unteren Bereich an der Ostseite der Cheopspyramide nur einige Rampen mit geringerer Neigung angeordnet waren, um die größeren Steine mit einem Gewicht bis zu 60 t, die über den Aufweg angeliefert wurden, transportieren zu können.

Vorstellbar wäre auch, dass der Aufweg mit gleich bleibender Steigung bis an die Pyramide herangeführt wurde, um so eine Höhe von 46–55 m (Abb.30) über dem Nullniveau der Pyramide zu erreichen. Die dafür erforderlichen Betrachtungen sind jedoch nicht Bestandteil dieser Betrachtungen.

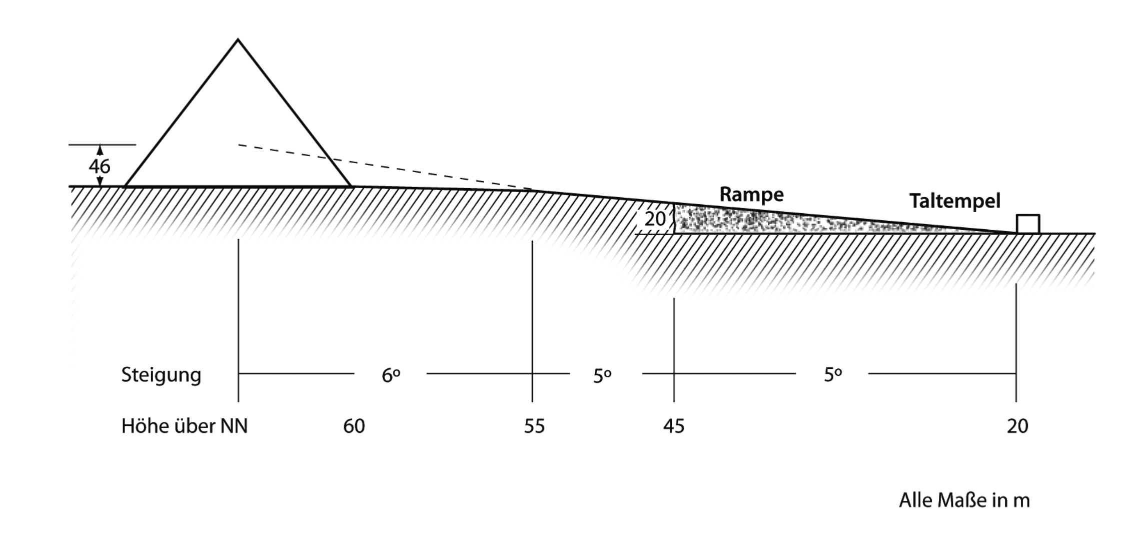


Abb.30 Denkbare Verlängerung des Aufwegs als Rampe zum Transport der schweren Materialien

Aufgrund seiner Untersuchungen der topografischen Situation an der SW-Ecke zeigt Lehner auf, dass die vom Steinbruch vom Süden her kommende Rampe bei einer Verlängerung die Pyramide etwa 30 m über dem Nullniveau treffen würde (Abb.31).[70] Auf die kürzlich von Haase vorlegte Hypothese für eine Rampe für die Schwertransporte bei Bau der Cheopspyramide[71] sei hingewiesen.

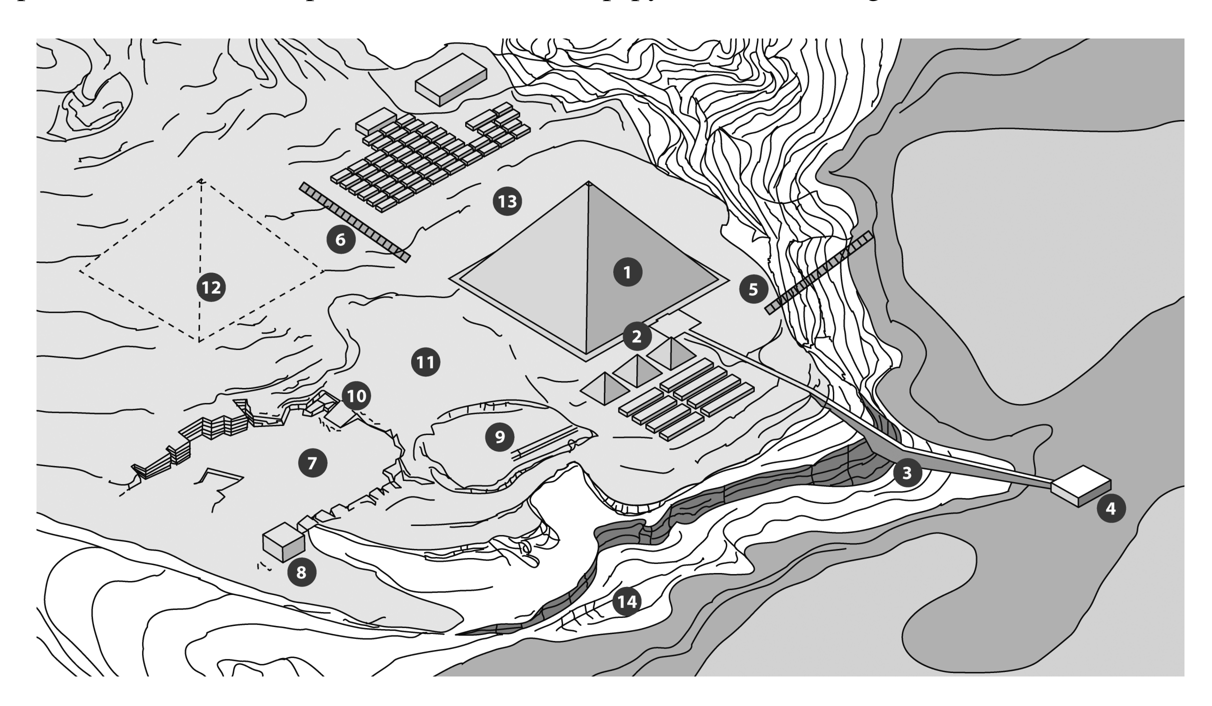


Abb.8.4.3 Topografie des Gisa-Plateaus, Steinbrüche und Transporttrassen für den Bau der Cheopspyramide

[70] M. Lehner, The Development of the Gisa Necropolis: The Khufu Project, MDAIK 1985, 109–143.
[71] M. Haase, Eine Rampe für Schwertransporte beim Bau der Cheops-Pyramide, Sokar 2/2007 48–49 und Die megalithische Mauer westlich der Cheopspyramide, in: Sokar 20 (1/2010), S.22ff.

Erläuterung	1	Cheopspyramide
	2	Totentempel
	3	Aufweg
	4	Taltempel und Hafenbecken
	5	Nordöstliche Rampe nach Haase
	6	„Tangentiale Westrampe“ nach Haase
	7	Hauptsteinbruch (Central Field)
	8	Östlich gelegener Steinbruch (Bau der Chephrenpyramide)
	9	Steinbruch mit Rampe nach Saleh
	10	Rampen am Nordrand des Hauptsteinbruchs in Richtung Pyramide
	11	Gelände mit Ablagerungen umfangreichen Bauschutts
	12	Standort der Chephrenpyramide
	13	Künstlicher Geländeeinschnitt westlich der Pyramide
	14	Östlicher Steilabbruch des Wüstenplateaus

Zusammenfassung und Ergebnisse

Verschiedenen bisher veröffentlichten Hypothesen zum Pyramidenbau (Stadelmann, Arnold, Lehner, Goyon, Klemm und Klemm, Lattermann, Houdin) liegt der Einsatz von senkrecht auf die Pyramiden zuführenden oder um die Pyramide herum angeordneten Rampen (Integralrampen) zugrunde. Andere Vorschläge beinhalten steile, parallel zu den Stufen des Kernmauerwerks angeordnete Rampen (Landt, Graefe). Weitere Bauvorschläge befassen sich mit dem Einsatz von Seilwinden (z.B. Riedl, Pitlik, Keyssner). Bei den meisten Hypothesen wird jedoch entgegen den archäologischen Befunden von einer schichtweisen Verlegung des Kernmauerwerks ausgegangen und in vielen Fällen sind auch zu steile Rampen angenommen. Ungelöst bleiben fast immer auch die Fragen des Aufsetzens des Pyramidion und der gefahrlosen Montage der Außenverkleidung sowie deren Glättung. Auch Berechnungen zu Bauzeiten werden nur selten vorgelegt.

Die im Rahmen der vom Autor durchgeführten Untersuchungen und Überlegungen führen zu der Schlussfolgerung, dass die bautechnischen Schwierigkeiten bei der Knickpyramide die Baumeister zwangen, eine andere, gegen Bodensenkungen und Erdstöße sichere Bauweise für den Bau der Roten Pyramide und folgender Pyramidenbauten zu entwickeln, die darüber hinaus auch der Forderung des Königs nach einer schnellen Fertigstellung genügen konnte. Das Ergebnis war die Errichtung des Pyramidenkerns in Stufenform, um einerseits eine größere Stabilität des Baukörpers zu erzielen und andererseits über auf allen vier Seiten des Bauwerks parallel zum Kernmauerwerk angeordneten Rampen in möglichst kurzer Zeit viel Material zu transportieren. Hinzu kam die Verwendung größerer Steinformate. Beim anschließenden Bau der Cheopspyramide wurde diese Bauweise unter Verwendung noch größerer Steinformate übernommen, um dieses gewaltige Bauwerk in überschaubarer Zeit erstellen zu können.

Mit der hiermit vorgelegten Bauhypothese für die Stufenpyramiden im AR wird eine Kombination zwischen den archäologisch belegten Prinzipien der Rampe und der Umlenkrolle vorgeschlagen. Damit können parallel zu den einzelnen Stufen des Kernmauerwerks und der äußeren Umbauung (Arbeitsplattform) angeordnete Rampen mit wesentlich größerer Neigung angenommen werden, als dies in bisher formulierten Bauhypothesen für den Materialtransport mittels Zugmannschaften möglich ist. Dadurch wird, wie am Beispiel der Pyramide des Mykerinos gezeigt, eine Bauweise möglich, die ohne senkrecht auf die Pyramide zulaufende bzw. umlaufende Rampen geringer Neigung auskommt. Auch Vorschläge für komplizierte Techniken für den Bau werden dadurch obsolet. Die Verwendung mehrerer Rampen mit einer großen Steigung (26,5°; Steigung 2:1) auf den einzelnen Stufen des Kernmauerwerks und der Umbauung sowie auf jeder Seite der Pyramide führt zu einem hohen Materialfluss und ermöglicht so eine zeitoptimierte Errichtung des Bauwerks.

Im Anschluss an die Errichtung des Kernmauerwerks und nach Rückbau der dafür benötigten Baurampen erfolgte Schicht für Schicht der Bau des Verkleidungsmauerwerks und der Außenverkleidung. Dafür wurden entlang der Außenseiten der Pyramide stufenförmige Arbeitsplattformen und Baurampen eingerichtet, die nach Fertigstellung der Pyramide im Takt mit der Glättung der Außenverkleidung von oben nach unten wieder abgebaut wurden. Durch die Umbauung mit der Arbeitsplattform über die Fluchtlinie der Außenverkleidung der Pyramide hinaus ergibt sich eine einfache Methode zur Konstruktion der Pyramidenspitze und des Aufsetzens des Pyramidion.

Der Berechnung der Transportleistungen und den sich daraus ergebenden Bauzeiten liegen jeweils die ungünstigsten Annahmen wie Größe und Gewicht der Steinblöcke, große Gleitreibungszahl der Oberflächen der Rampen, Taktzeiten etc. zugrunde. Günstigere Werte würden zum Einsatz einer geringeren Anzahl von Rampen bzw. kürzeren Bauzeiten führen. Verschiedentlich sind auch bauliche Alternativlösungen (z.B. Oberfläche der Rampen) angesprochen, die jedoch die Bauweise nicht grundsätzlich beeinflussen.

Eine Berechnung der Bauzeiten für die Pyramiden des Mykerinos, des Snofru (Rote Pyramide) und des Cheops ergibt unter realitätsnahen bautechnischen Annahmen folgende Werte:

Pyramide des Mykerinos: Planung und Vorbereitung 1 Jahr;
Bau einschließlich Glättung ca. 4,8;
insgesamt ***5,8 Jahre***.

Rote Pyramide: Planung und Vorbereitung 2 Jahre;
Bau einschließlich Glättung ca. 18,7 Jahre;
insgesamt ***20,7 Jahre***.

Cheopspyramide: Planung und Vorbereitung 2 Jahre;
Bau einschließlich Glättung ca. 22,5 Jahre;
insgesamt ***24,5 Jahre***.

Diese Bauzeiten passen zu der allgemein angenommen Dauer der Herrschaft der Könige Snofru mit 35 Jahren,[72] Cheops mit 23 Jahren[73] und Mykerinos mit 28[74] bzw. 6[75] Jahren.

Die hiermit vorgelegte und auf der Grundlage der archäologischen Befunde entwickelte Hypothese „Pyramidenbau mit Rampen und Seilumlenkrollen“ verbindet erstmals den Einsatz steiler, parallel zu den Stufen des Kernmauerwerks angeordneter Rampen in Kombination mit der Walze für den Materialtransport <u>und</u> den Bau von Arbeitsplattformen für die gefahrlose Montage des Pyramidion und die Glättung der Pyramidenverkleidung.

[72] Nach R. Krauss – D.D. Warburton, Ancient Egyptian Chronology (Leiden 2006) S. 490, neuerdings 33 Jahre. Beginn der Bauarbeiten der Roten Pyramide im Jahr 15 der Regentschaft Snofrus.
[73] Nach R. Krauss – D.D. Warburton, Ancient Egyptian Chronology (Leiden 2006), S. 491 neuerdings 26 Jahre.
[74] J. v. Beckerath, Chronologie des pharaonischen Ägypten (Mainz 1997), S. 188.
[75] Nach R. Krauss – D.D. Warburton, Ancient Egyptian Chronology (Leiden 2006), S. 485 neuerdings 6 Jahre.